

**Mon. Oct 24, 2022**

Room C | Regular session : S06. Crustal structure

9:45 AM - 10:45 AM JST | 12:45 AM - 1:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S06] AM-1**

chairperson: Takahiro Shiina (Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S06-01] Detailed seismic structure and seismic activities along the plate interface off Cape Muroto Nankai Trough

\*Gou FUJIE<sup>1</sup>, Ryuta Arai<sup>1</sup>, Kazuya Shiraishi<sup>1</sup>, Yasuyuki Nakamura<sup>1</sup>, Shuichi Kodaira<sup>1</sup>, Gaku Kimura<sup>1</sup>, Yuka Kaiho<sup>1</sup>, Koichiro Obana<sup>1</sup>, Seiichi Miura<sup>1</sup> (1. JAMSTEC)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S06-02] Relationship between slow earthquakes and temporal changes in seismological structure in the shallow Nankai subduction zone

\*Takashi TONEGAWA<sup>1</sup>, Takeshi Akuhara<sup>2</sup>, Yusuke Yamashita<sup>3</sup>, Hiroko Sugioka<sup>4</sup>, Masanao Shinohara<sup>2</sup>, Shunsuke Takemura<sup>2</sup>, Takeshi Tsuji<sup>2</sup> (1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo, 3. Kyoto Univ., 4. Kobe Univ.)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S06-03] Upper-plate structural heterogeneities controlling shallow tremor: Results from active-source seismic surveys in the Hyuga-nada area

\*Ryuta ARAI<sup>1</sup>, Seiichi Miura<sup>1</sup>, Yasuyuki Nakamura<sup>1</sup>, Kazuya Shiraishi<sup>1</sup>, Gou Fujie<sup>1</sup>, Shuichi Kodaira<sup>1</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>1</sup>, Ayako Nakanishi<sup>1</sup>, Yuka Kaiho<sup>1</sup>, Yohei Hamada<sup>1</sup>, Yanxue Ma<sup>2</sup>, Kimihiro Mochizuki<sup>2</sup>, Rie Nakata<sup>2</sup>, Masataka Kinoshita<sup>2</sup>, Yoshitaka Hashimoto<sup>3</sup> (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Kochi University)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S06-04] Mantle Wedge Anisotropy from Tectonic Tremors beneath the Bungo Channel

\*Motoko ISHISE<sup>1</sup>, Aitaro KATO<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

## Room C | Regular session : S06. Crustal structure

11:00 AM - 12:00 PM JST | 2:00 AM - 3:00 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S06] AM-2**

chairperson: Ryuta Arai (JAMSTEC)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

**[S06-05] Shallow crustal structure and slip tendency of bend-faults in the outer rise of the Japan Trench**\*Yue SUN<sup>1</sup>, Ayumu Miyakawa<sup>2</sup>, Ehsan Jamali Hondori<sup>3</sup>, Jin-oh Park<sup>1</sup> (1. AORI, the University of Tokyo, 2. AIST, 3. GSE)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

**[S06-06] The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling - III**\*Takaya IWASAKI<sup>1</sup>, Hiroshi SATO<sup>2,3</sup>, Eiji KURASHIMO<sup>3</sup>, Hirokazu ISHIGE<sup>4</sup>, Hidehiko SHIMIZU<sup>5</sup>, Tatsuya ISHIYAMA<sup>3</sup>, Takashi IIDAKA<sup>6</sup>, Masanao SHINOHARA<sup>3</sup>, Shinji KAWASAKI<sup>4</sup>, Susumu ABE<sup>4</sup>, Naoshi HIRATA<sup>3</sup> (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. JGI, Inc., 5. JOGMEC, 6. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

**[S06-07] An estimation of the crustal reflector in the north Ibaraki area using S-wave later phases**\*Takahiro SHIINA<sup>1</sup>, Yuta AMEZAWA<sup>1</sup>, Takahiko UCHIDE<sup>1</sup>, Haruo HORIKAWA<sup>1</sup>, Kazutoshi IMANISHI<sup>1</sup> (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

**[S06-08] A preliminary report of faults and natural gas layers observed in lowlands of the eastern Tokyo**\*Tetsuro TSURU<sup>1</sup>, Naoto KUMAGAI<sup>1</sup>, Kazuo YAMAGUCHI<sup>2</sup>, Jinoh PARK<sup>3</sup> (1. TUMSAT, 2. AIST, 3. AORI, The University of Tokyo)

## Room C | Regular session : S06. Crustal structure

4:00 PM - 5:00 PM JST | 7:00 AM - 8:00 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S06] PM-2**

chairperson: Takashi Tonegawa (JAMSTEC)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

**[S06-09] Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm in the Noto Peninsula, central Japan**\*Tomomi Okada<sup>1</sup>, Martha Savage<sup>2</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup>, Keisuke Yoshida<sup>1</sup>, Naoki Uchida<sup>4</sup>, Ryota Takagi<sup>1</sup>, Shuutoku Kimura<sup>1</sup>, Satoshi Hirahara<sup>1</sup>, Toru Matsuzawa<sup>1</sup> (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington, New Zealand, 3. The Interfaculty Initiative in Information Studies, University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

**[S06-10] Detailed structure of the uppermost part of the Philippine Sea Plate beneath the Kii Peninsula**\*Katsuhiko Shiomi<sup>1</sup> (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

**[S06-11] Spatial variations and causes of fracture structure in and around Hakone volcano**\*Ryou HONDA<sup>1</sup>, Yuki Abe<sup>1</sup>, Yohei Yukutake<sup>2</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup> (1. Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

**[S06-12] Seismic velocity structure beneath Kikai-caldera, Japan, from seismic refraction survey**\*Akihiro Nagaya<sup>1</sup>, Gou Fujie<sup>2</sup>, Shuichi Kodaira<sup>2</sup>, Satoru Tanaka<sup>2</sup>, Yojiro Yamamoto<sup>2</sup>, Hiroko Sugioka<sup>4,1</sup>, Hiroki Miyamachi<sup>3</sup>, Tetsuo Matsuno<sup>4</sup>, Hironori Otsuka<sup>4</sup>, Keita Suzuki<sup>4,5</sup>, Nobukazu Seama<sup>1,4</sup> (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 4. Ocean Bottom Exploration Center, Kobe University, 5. Nippon Marine Enterprises, Ltd)

**Room C | Regular session : S19. Seismology, general contribution**

5:15 PM - 6:00 PM JST | 8:15 AM - 9:00 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S19] PM-3**

chairperson: Keisuke Onodera (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

**[S19-01] Room Seismic Intensity measurement by a ultra compact seismometer**\*Naoshi HIRATA<sup>1</sup>, Takashi FURUYA<sup>2</sup>, Hiroshi TSURUOKA<sup>1</sup> (1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. ISAD)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

**[S19-02] Estimation of the sources of primary microseisms excited by typhoons around Japan**\*Hiroki Kawakami<sup>1</sup>, Naoki Suda<sup>1</sup> (1. Hiroshima University)

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

**[S19-03] Introduction of NASA's Titan Exploration Mission: Dragonfly – For the first seismic investigation on an icy moon–**

\*Keisuke Onodera<sup>1</sup>, Hiroaki Shiraishi<sup>2</sup>, Satoshi Tanaka<sup>2</sup>, Taichi Kawamura<sup>3</sup>, Takefumi Mitani<sup>2</sup>, Hideki Murakami<sup>4</sup>, Ryuhei Yamada<sup>5</sup>, Shunichi Kamata<sup>6</sup>, Jun Kimura<sup>7</sup>, Hiroyuki Kurokawa<sup>8</sup>, Kiwamu Nishida<sup>1</sup>, Yasuhito Sekine<sup>8</sup>, Takeshi Tsuji<sup>9</sup>, Ralph Lorenz<sup>10</sup> (1. ERI/The University of Tokyo, 2. ISAS/JAXA, 3. IPGP, 4. Kochi University, 5. The University of Aizu, 6. Hokkaido University, 7. Osaka University, 8. Tokyo Institute of Technology, 9. School of Engineering/The University of Tokyo, 10. Johns Hopkins University)

**Tue. Oct 25, 2022**

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

9:45 AM - 11:00 AM JST | 12:45 AM - 2:00 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S01] AM-1**

chairperson: Kiyoshi YOMOGIDA (Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University), Atsushi Nozu (Port and Airport Research Institute)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S01-01] Required conditions for the formulation of seismic interferometry under simultaneous incidence of P, S and Rayleigh waves

\*Atsushi NOZU<sup>1</sup>, Yosuke Nagasaka<sup>1</sup> (1. Port and Airport Research Institute)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S01-02] Seismic velocity response to ground water level revealed by ACROSS and seismic array

\*Hiromu Ohba<sup>1</sup>, Ryoya Ikuta<sup>1</sup>, Koshun Yamaoka<sup>2</sup>, Shuhei Tsuji<sup>3</sup>, Feng Chen<sup>2</sup>, Toshiki Watanabe<sup>2</sup>, Haruno Koike<sup>2</sup> (1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Japan Agency for Marine Earth Science and Technology)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S01-03] Active seismic monitoring tests on a field slope during rainfall

\*Masayuki NAKAYAMA<sup>1</sup>, Hironori KAWAKATA<sup>1</sup>, Issei DOI<sup>2</sup> (1. Ritsumeikan Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ.)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S01-04] Semblance analysis of seismic array records using wasserstein metric

\*Tatsuki Nara<sup>1</sup>, Hiroyuki Goto<sup>2</sup> (1. Kyoto University Graduate School, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S01-05] Parameter optimization of non-linear modellings with a surrogate function: Application to waveform inversions

\*Kiyoshi YOMOGIDA<sup>1</sup> (1. Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University)

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

11:15 AM - 12:30 PM JST | 2:15 AM - 3:30 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S01] AM-2**

chairperson: Hisashi NAKAHARA (Graduate School of Science, Tohoku University), Daisuke Sato (DPRI, Kyoto University)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S01-06] Computational difficulty of posterior means and ABIC in fully Bayesian inference: a proposal of new Monte-Carlo methods

\*Daisuke Sato<sup>1</sup>, Yukitoshi Fukahata<sup>1</sup> (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

---

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S01-07] Accuracy evaluation of the approximation of spatiotemporal boundary integral equation toward implementation of FDP-H matrices

\*Takumi Miyajima<sup>1</sup>, Ryosuke Ando<sup>1</sup> (1. The University of Tokyo)

---

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S01-08] Formularization of spatial autocorrelation for DAS and 3C seismometer and application to seafloor cable data off Sanriku

\*Shun FUKUSHIMA<sup>1,2</sup>, Masanao SHINOHARA<sup>2</sup>, Tomoaki YAMADA<sup>2</sup>, Kiwamu NISHIDA<sup>2</sup>, Akiko TAKEO<sup>2</sup>, Kiyoshi YOMOGIDA<sup>3</sup> (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences)

---

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S01-09] Formulation of the mixed cross-correlations between displacement and DAS axial strain

\*Hisashi NAKAHARA<sup>1</sup>, Matthew M. Haney<sup>2</sup> (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Alaska Volcano Observatory, USGS)

---

12:15 PM - 12:30 PM JST | 3:15 AM - 3:30 AM UTC

[S01-10] Amplitude dependence of seismic wave attenuation

\*Hayato Tero<sup>1</sup>, Junichi Nakajima<sup>1</sup> (1. Tokyo Institute of Technology)

Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

2:00 PM - 3:30 PM JST | 5:00 AM - 6:30 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S01] PM-1**

chairperson:Kiwamu Nishida(ERI, the university of Tokyo), Masahiro Kosuga(Hirosaki University)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S01-11] Near-trench amplification of seismic waves from deep earthquakes in low-frequency band: comparison between observation and 2D simulation

\*Yuki Ihara<sup>1</sup>, Shiro Hirano<sup>1</sup>, Hironori Kawakata<sup>1</sup> (1. Ritsumeikan University)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S01-12] Examination of broadband slant-stacked waveform with synthetic one by 3-D wave propagation and their application to focal depth estimation

\*Masahiro KOSUGA<sup>1</sup> (1. Graduate School of Science and Technology)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S01-13] Extraction of P-s converted wave from teleseismic P-wave microseisms

\*Shota KATO<sup>1</sup>, Kiwamu Nishida<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S01-14] On the sensitivity kernels for Rayleigh wave azimuthal anisotropy

\*Hitoshi KAWAKATSU<sup>1,2</sup> (1. Earthquake Research Institute, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S01-15] Ocean external gravity wave excited by the 2022 eruption of Hunga volcano, Tonga

\*Kiwamu NISHIDA<sup>1</sup>, Takashi TONEGAWA<sup>2</sup>, Tatsuya KUBOTA<sup>3</sup>, Mie ICHIHARA<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. NIED)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S01-16] Eruption sequence of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano from P-wave back-projection: Atmospheric coupling mode and eruption cycles

\*Kazunori YOSHIKAWA<sup>1,2</sup>, Kotaro TARUMI<sup>2</sup> (1. Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University)

## Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

3:45 PM - 4:45 PM JST | 6:45 AM - 7:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S03] PM-2**

chairperson:Yuya Machida(JAMSTEC), Yohei Kinoshita(University of Tsukuba)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

**[S03-01]** Experimental characterization of sensor drift of pressure gauges using a pressure standard\*Hiroyuki MATSUMOTO<sup>1</sup>, Hiroaki KAJIKAWA<sup>2</sup>, Keisuke ARIYOSHI<sup>1</sup>, Eiichiro ARAKI<sup>1</sup> (1. JAMSTEC, 2. AIST)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

**[S03-02]** Seafloor geodetic observation using the pressure gauges without inherent drift components in the Nankai trough seismogenic zone\*Yuya MACHIDA<sup>1</sup>, Shuhei Nishida<sup>1</sup>, Hiroyuki Matsumoto<sup>1</sup>, Araki Eiichiro<sup>1</sup> (1. JAMSTEC / IMG)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

**[S03-03]** Shallow slow slip and associated VLFE activity observed by seafloor fiber optic strainmeter in the Nankai Trough.\*Eiichiro ARAKI<sup>1</sup>, Takashi Yokobiki<sup>1</sup>, Satoru Baba<sup>1</sup>, Yojiro Yamamoto<sup>1</sup>, Mark Zumberge<sup>2</sup>, Shuhei Nishida<sup>1</sup>, Yuya Machida<sup>1</sup>, Hiroyuki Matsumoto<sup>1</sup> (1. JAMSTEC Institute for Marine Geodynamics, 2. Scripps Institution of Oceanography)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

**[S03-04]** Sentinel-1 SAR observation at the northern Noto peninsula associated with active seismicity since the end of 2020\*Yohei Kinoshita<sup>1</sup> (1. University of Tsukuba)

## Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

5:00 PM - 5:45 PM JST | 8:00 AM - 8:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S03] PM-3**

chairperson:Yuya Machida(JAMSTEC), Yohei Kinoshita(University of Tsukuba)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

**[S03-05]** Dense GNSS observations around strain-rate concentration zones – Detailed velocity distribution in the San-in shear zone and Arima-Takatsuki fault zone\*Takuya NISHIMURA<sup>1</sup> (1. Kyoto University)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

**[S03-06]** Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and its application to gravity Bayesian inversion\*Yuanyuan Niu<sup>1</sup>, Jiancang Zhuang<sup>2,1</sup> (1. SOKENDAI, 2. ISM)

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

**[S03-07]** Strain and barometric pressure observations of the 2022 Hunga-Tonga eruption with a laser strainmeter at Kamioka\*Akiteru TAKAMORI<sup>1</sup>, Akito ARAYA<sup>1</sup>, Kouseki MIYO<sup>2</sup>, Tatsuki WASHIMI<sup>3</sup>, Takaaki YOKOZAWA<sup>2</sup>, Hideaki HAYAKAWA<sup>2</sup>, Masatake OHASHI<sup>2</sup> (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 3. National Astronomical Observatory of Japan)

**Wed. Oct 26, 2022**

Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

9:45 AM - 10:45 AM JST | 12:45 AM - 1:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S03] AM-1**

chairperson:Yutaro Okada(Kyoto University), Yuto Nakamura(Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S03-08] Positioning accuracy evaluation of GNSS-A analysis software GARPOS using numerical simulation

\*Yuto NAKAMURA<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup> (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S03-09] Examination of new method of acoustic signal detection in SGO-A

\*Koya Nagae<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup>, Yuto Nakamura<sup>1</sup> (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S03-10] Acoustic signal angle/device dependences and up-down component error in SGO-A

\*Yusuke YOKOTA<sup>1</sup>, Koya Nagae<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>2</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>2</sup>, Yuto Nakamura<sup>2</sup> (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S03-11] Lack of inter-plate coupling at the southwestern end of the Ryukyu Trench observed by GNSS/Acoustic geodesy

\*Ryosuke Nakahata<sup>1</sup>, Ryoya Ikuta<sup>1</sup>, Akihiro Nagaya<sup>2</sup>, Keiichi Tadokoro<sup>3</sup>, Mamoru Nakamura<sup>4</sup>, Rumi Sohrin<sup>1</sup>, Yasushi Harada<sup>5</sup>, Masataka Ando<sup>1</sup> (1. Shizuoka University, 2. Kobe University, 3. Nagoya University, 4. University of the Ryukyus, 5. Tokai University)

Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

11:00 AM - 12:00 PM JST | 2:00 AM - 3:00 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S03] AM-2**

chairperson:Yutaro Okada(Kyoto University), Yuto Nakamura(Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[S03-12] Systematic detection of short-term slow slip events along the Japan and Kuril Trenches

\*Yutaro OKADA<sup>1</sup>, Takuya NISHIMURA<sup>2</sup> (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S03-13] Detectability of plate boundary slip at the Nankai trough and the Japan trench

\*Tadashi ISHIKAWA<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup> (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S03-14] Possible effect of low viscosity zone along lithosphere-asthenosphere boundary due to earthquake in the Nankai Trough

\*Sota Murakami<sup>1</sup>, Akinori Hashima<sup>2</sup>, Takeshi Iinuma<sup>2</sup>, Kohei Fujita<sup>1</sup>, Tsuyoshi Ichimura<sup>1</sup>, Takane Hori<sup>2</sup> (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S03-15] Study on viscus flow and rheological heterogeneity caused by large earthquake along the Nankai trough

\*Hisashi SUIITO<sup>1</sup> (1. GSI of Japan)

**Room C | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system****1:30 PM - 2:45 PM JST | 4:30 AM - 5:45 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)****[S02] PM-1**

chairperson: Masayuki Yoshimi (The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), Masayuki Obayashi (JAMSTEC)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[S02-01] The Explosive Hunga Tonga Eruption observed by an Array of Hydroacoustic MERMAID Floats

\*Masayuki OBAYASHI<sup>1</sup>, Junko Yoshimitsu<sup>1</sup>, Hiroko Sugioka<sup>2</sup>, Joel D Simon<sup>3</sup>, Yu Yong<sup>4</sup> (1. JAMSTEC, 2. Kobe University, 3. Princeton University, 4. SUSTech)

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[S02-02] Study on the underwater acoustic signals associated with the eruption at Fukutoku-Oka-No-Ba observed with the OBSs of S-net

\*Ryoichi IWASE<sup>1</sup> (1. JAMSTEC)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S02-03] Simultaneous observation of passing vehicles using DAS, a video camera, and a broadband seismometer on National Route 4

\*Katsuhiro YABU<sup>1</sup>, Hisashi NAKAHARA<sup>1</sup>, Kentaro EMOTO<sup>2</sup>, Takeshi NISHIMURA<sup>1</sup> (1. Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University.)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S02-04] Characteristics of DAS records for earthquakes and controlled sources on off-Sanriku seafloor optical fiber cable

\*Masanao SHINOHARA<sup>1</sup>, Tomoaki Yamada<sup>1</sup>, Hiroki Takano<sup>2</sup>, Eiji Kurashimo<sup>1</sup>, Rie Nakata<sup>1</sup>, Kimihiro Mochizuki<sup>1</sup>, Takeshi Akuhara<sup>1</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup> (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. ERI, now at INPEX Co., 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S02-05] Earthquake observation by Distributed Acoustic Sensing on optical fiber along a Shinkansen track around Suruga Bay

\*Masayuki YOSHIMI<sup>1</sup>, Satoshi IDE<sup>2</sup>, Teppei ENARI<sup>3</sup>, Daiki TAYA<sup>3</sup>, Shuji IWATA<sup>4</sup> (1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Graduate School of Science, Tokyo Univ., 3. Earthquake Research Institute, Tokyo Univ., 4. Central Japan Rail Company)

## Room C | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system

3:00 PM - 4:15 PM JST | 6:00 AM - 7:15 AM UTC | ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S02] PM-2**

chairperson:Hajime Shiobara(Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Toshinori Sato(Chiba University)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

**[S02-06] Classification for Earthquakes with Linked Data**\*Hiroki UEMATSU<sup>1,2,3</sup>, Ahyi Kim<sup>3</sup>, Hideaki Takeda<sup>1,2</sup> (1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. National Institute of Informatics, 3. Yokohama City University)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

**[S02-07] Development of multi-platform next-generation WIN system (2)**\*Shigeki NAKAGAWA<sup>1</sup>, Hiroshi AOYAMA<sup>2</sup>, Hiroaki TAKAHASHI<sup>2</sup>, Takuto MAEDA<sup>3</sup>, Naoki UCHIDA<sup>1</sup>, Mare YAMAMOTO<sup>4</sup>, Kazuo OHTAKE<sup>5</sup>, Hiroshi TSURUOKA<sup>1</sup>, Yosuke AOKI<sup>1</sup>, Yuta MAEDA<sup>6</sup>, Shiro OHMI<sup>7</sup>, Haruhisa NAKAMICHI<sup>7</sup>, Makoto OKUBO<sup>8</sup>, Takeshi MATSUSHIMA<sup>9</sup>, Hiroshi YAKIWARA<sup>10</sup>, Katsuhiko SHIOMI<sup>11</sup>, Kenji UEHIRA<sup>11</sup>, Hideki UEDA<sup>11</sup>, Kazuki MIYAOKA<sup>12</sup>, Koji TAMARIBUCHI<sup>13</sup>, Ryo HONDA<sup>14</sup>, Shutaro SEKINE<sup>15</sup> (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Systems Design Lab, the University of Tokyo, 6. Nagoya University, 7. Kyoto University, 8. Kochi University, 9. Kyushu University, 10. Kagoshima University, 11. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 12. Japan Meteorological Agency, 13. Meteorological Research Institute, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

**[S02-08] Hypocenter location system with automatic correction of picking data by relative hypocenter location method**\*Shigeki Horiuchi<sup>1</sup>, Yuko Satou<sup>1</sup>, Yoshihisa Iio<sup>2</sup>, Aitarou Kato<sup>3</sup>, Tomomi Okada<sup>4</sup> (1. Home Seismometer Corporation, 2. Kyoto Univ., 3. Univ. of Tokyo, 4. Tohoku Univ.)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

**[S02-09] Development of a small and high-performance broadband seismometer applicable to hard environments**\*Ryuhei YAMADA<sup>1</sup>, Kazuyoshi Asari<sup>2</sup>, Hiroaki Shiraishi<sup>3</sup> (1. The University of Aizu, 2. National Astronomical Observatory of Japan, 3. JAXA/ISAS)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

**[S02-10] Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor: temperature coefficient**\*Hajime SHIOBARA<sup>1</sup>, Masanao Shinohara<sup>1</sup>, Toshinori Sato<sup>2</sup>, Aki Ito<sup>3</sup>, Hiroko Sugioka<sup>4</sup> (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Chiba University, 3. JAMSTEC, 4. KOBEC, Kobe University)

**Room C | Regular session : S06. Crustal structure**

📅 Mon. Oct 24, 2022 9:45 AM - 10:45 AM JST | Mon. Oct 24, 2022 12:45 AM - 1:45 AM UTC | 🏢 ROOM C  
8th floor (Training Room 820)

**[S06] AM-1**

chairperson: Takahiro Shiina (Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S06-01] Detailed seismic structure and seismic activities along the plate interface off Cape Muroto Nankai Trough

\*Gou FUJIE<sup>1</sup>, Ryuta Arai<sup>1</sup>, Kazuya Shiraishi<sup>1</sup>, Yasuyuki Nakamura<sup>1</sup>, Shuichi Kodaira<sup>1</sup>, Gaku Kimura<sup>1</sup>, Yuka Kaiho<sup>1</sup>, Koichiro Obana<sup>1</sup>, Seiichi Miura<sup>1</sup> (1. JAMSTEC)

---

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S06-02] Relationship between slow earthquakes and temporal changes in seismological structure in the shallow Nankai subduction zone

\*Takashi TONEGAWA<sup>1</sup>, Takeshi Akuhara<sup>2</sup>, Yusuke Yamashita<sup>3</sup>, Hiroko Sugioka<sup>4</sup>, Masanao Shinohara<sup>2</sup>, Shunsuke Takemura<sup>2</sup>, Takeshi Tsuji<sup>2</sup> (1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo, 3. Kyoto Univ., 4. Kobe Univ.)

---

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S06-03] Upper-plate structural heterogeneities controlling shallow tremor: Results from active-source seismic surveys in the Hyuga-nada area

\*Ryuta ARAI<sup>1</sup>, Seiichi Miura<sup>1</sup>, Yasuyuki Nakamura<sup>1</sup>, Kazuya Shiraishi<sup>1</sup>, Gou Fujie<sup>1</sup>, Shuichi Kodaira<sup>1</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>1</sup>, Ayako Nakanishi<sup>1</sup>, Yuka Kaiho<sup>1</sup>, Yohei Hamada<sup>1</sup>, Yanxue Ma<sup>2</sup>, Kimihiro Mochizuki<sup>2</sup>, Rie Nakata<sup>2</sup>, Masataka Kinoshita<sup>2</sup>, Yoshitaka Hashimoto<sup>3</sup> (1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Kochi University)

---

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S06-04] Mantle Wedge Anisotropy from Tectonic Tremors beneath the Bungo Channel

\*Motoko ISHISE<sup>1</sup>, Aitaro KATO<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo)

## Detailed seismic structure and seismic activities along the plate interface off Cape Muroto Nankai Trough

\*Gou FUJIE<sup>1</sup>, Ryuta Arai<sup>1</sup>, Kazuya Shiraishi<sup>1</sup>, Yasuyuki Nakamura<sup>1</sup>, Shuichi Kodaira<sup>1</sup>, Gaku Kimura<sup>1</sup>, Yuka Kaiho<sup>1</sup>, Koichiro Obana<sup>1</sup>, Seiichi Miura<sup>1</sup>

### 1. JAMSTEC

日本列島下にフィリピン海プレートが沈み込む南海トラフでは、M8を超える巨大地震のほか、微小地震や各種スロー地震(低周波微動、超低周波地震、非地震性滑りなど)まで、多様なプレート境界断層滑り現象が発生している。巨大地震とスロー地震の関係性はまだよく分かっていないところもあるが、たとえば超低周波地震は巨大地震震源域より浅い側(トラフ軸側)と深い側(陸側)に分布するなど、同じプレート境界断層の滑り現象でありながら、通常地震とスロー地震では発生場所を棲み分けていると考えられている。したがって、両者の発生場の構造的な特徴を把握できれば、プレート境界滑り現象の多様性を決定付ける要因、すなわちプレート間固着を決定付ける要因の理解に繋がると期待される。

海洋研究開発機構では南海トラフ沈み込み帯におけるプレート間固着・すべり分布の現状把握とモニタリングを目指し、海底観測ネットワークの構築を進めるとともに、2018年度から大規模な海域構造探査によりプレート境界断層の実態把握研究を進めている。この一環で、2019年末、我々は浅部超低周波地震(sVLFE)が活発な室戸岬沖で制御振源(エアガン)と稠密な海底地震計アレイ(2km間隔)を用いた構造調査観測を実施した。調査海域には、土佐簗と呼ばれる海底地形上の高まりと、その高まりを横切る土佐簗海盆と呼ばれる谷地形が顕著に発達しているのが特徴である。土佐簗海盆は海底地形の窪地であり、プレート境界断層はその下約10kmに位置するが、以下のように土佐簗海盆付近においてプレート境界断層滑り(固着・すべり)が大きく変化していることが知られている。まず、土佐簗海盆付近を境に海側(トラフ側)ではsVLFEが多数発生する一方、陸側ではsVLFEはほとんど発生していない。また、地殻変動観測研究では、土佐簗海盆付近を境に海側は固着が弱く、陸側は固着が強い傾向が示されている。したがって、土佐簗海盆直下のプレート境界部では、断層の固着・すべり状態が変化していることが期待される。

実際、土佐簗海盆直下には顕著な構造不均質性があることが最近の海洋研究開発機構の解析研究からも明らかになってきた。Nakamura et al. (2022, GRL)は潮岬から室戸岬にかけた広域で実施した稠密な地震波反射法データを解析することで、土佐簗海盆直下はプレート境界断層の形状か上盤内の地震波速度の異常帯に相当する可能性が高いことを指摘している。しかし、反射法データのみではプレート境界断層の確からしい形状やその周辺の物性を解き明かすことはできないため、断層固着・滑りを決定付けている構造要因についてはよく分かっていない。そこで、本研究では、反射法データのみからでは精度よく決定することができないプレート境界断層付近の詳細なプレート境界断層形状や断層付近の物性(地震波速度)を高い解像度でイメージングすることを目指して、海底地震計で観測される屈折波を活用して、下記の手順で高解像度地震波速度構造モデルを構築した。まず、初動走時トモグラフィによって長波長地震波速度構造モデルを構築し、その結果を初期構造として波形インバージョン(周波数領域、音響場、Full-waveform Inversion, FWI)によって短波長不均質をモデル化した。

FWIの結果から、土佐簗海盆付近を境に、プレート境界(ここでは沈み込む海洋地殻の表面とする)の上側の物性(地震波速度)が顕著に変化することが明らかになった。すなわち、スロー地震(sVLFE)が卓越する海側では、プレート境界直上の地震波速度は低い一方で、プレート固着が強い陸側ではプレート境界直上(上盤プレートの底面)の地震波速度が高い。これは、スロー地震が発生する浅部側のプレート境界面付近には沈み込むプレートが持ち込む堆積物などに由来する柔らかい物質が厚く分布している一方で、スロー地震が観測されていない深部側ではプレート境界面付近には柔らかい物質が失われていることを示唆していると考えられる。したがって、南海トラフ域におけるsVLFE発生域と固着域(通常地震が発生する領域)を隔つ要因の一つは、プ

レート境界断層付近の物性(低速度物質の分布)であると考えられる。

## Relationship between slow earthquakes and temporal changes in seismological structure in the shallow Nankai subduction zone

\*Takashi TONEGAWA<sup>1</sup>, Takeshi Akuhara<sup>2</sup>, Yusuke Yamashita<sup>3</sup>, Hiroko Sugioka<sup>4</sup>, Masanao Shinohara<sup>2</sup>, Shunsuke Takemura<sup>2</sup>, Takeshi Tsuji<sup>2</sup>

1. JAMSTEC, 2. Univ. of Tokyo, 3. Kyoto Univ., 4. Kobe Univ.

南海トラフ域の熊野灘から紀伊半島沖にかけて、沈み込み帯の浅部において2020年末から1ヶ月ほど活発なスロー地震活動が発生した（例えば、Takemura et al. 2022; Yamamoto et al. 2022; Ogiso and Tamaribuchi 2022）。Tonegawa et al. (2022)は南海トラフ域においてDONETのノイズ記録を用い、6~10年間に渡って地震波速度構造と不均質構造の2種類の時間変化を推定した。この期間には2020年末のイベントも含まれている。その結果、2020年末のイベント中に地震波速度が低下してそれがイベント後も残る一方、不均質構造はイベント中に変化し、その後イベント前の元の状態に戻ることを指摘した。これらは地震波速度と不均質構造の変化を引き起こしている現象の時間スケールが異なっていることが原因と考えられる。そこで、本研究では、DONET1とDONET2の間に設置され、かつ、2020年末のイベントを観測した海底地震計の記録を使用することで、これらの地震波速度および不均質構造の時空間変化のマッピングを行う。また、これらの結果から、2020年末のイベントの背景にある現象を理解することを試みる。

海底地震計は短周期地震計を使用しており、連続記録の期間は2019年9月~2021年5月である。相互相関関数の計算には上下動成分を使用し、周波数領域でスペクトルホワイトニングを行った。また、相当する期間のDONET1&2の上下動成分も使用した。周波数帯域は0.5-2.0 Hzである。それらを30日間毎にスタックし、リファレンス波形は全期間スタックした波形を使用した。地震波速度構造の時間変化の抽出にはストレッチング法を用い（Wegler and Sens-Schönfelder, 2007）、不均質構造の時間変化の抽出には相互相関係数を用いた（Obermann et al. 2013）。それぞれの空間マッピングにはObermann et al. (2013)の手法を用いた。

結果では、DONET1とDONET2の間でも地震波速度が低下してイベント後も継続し、不均質構造はイベント中に変化してその後もとに戻るといった現象が確認された。空間マッピングでは、熊野灘において、速度低下は浅部超低周波地震の分布と良い一致を示したが、その一方で、不均質構造の変化は浅部超低周波地震の分布とややずれるという結果となった（図参照）。

これらを解釈すると、不均質構造の時間変化は震源域内もしくはその周辺から上昇してきた流体の移動によるもの（Tonegawa et al. 2022）で、地震波速度の時間変化は上盤側の浅部の応力場がスロー地震によって変化したものと考えられる。つまり、不均質構造が流体の移動によって変化したのであれば（図右側）、同じ場所で速度が低下するべきだが、観測ではそのようになっていない（図左側）。また、それらの時間スケールも異なる。そのため、地震波速度の低下はスロー地震活動によって引き起こされた応力場の変化に対応していると考えられる。つまり、応力場の変化によってクラックの配向やアスペクト比、もしくは、付加体浅部のimbricate thrustに起因する亀裂の変形などが起こったと考えられる。

謝辞

DONETデータを使用しました。

Data citation DONET: doi:10.17598/NIED.0008

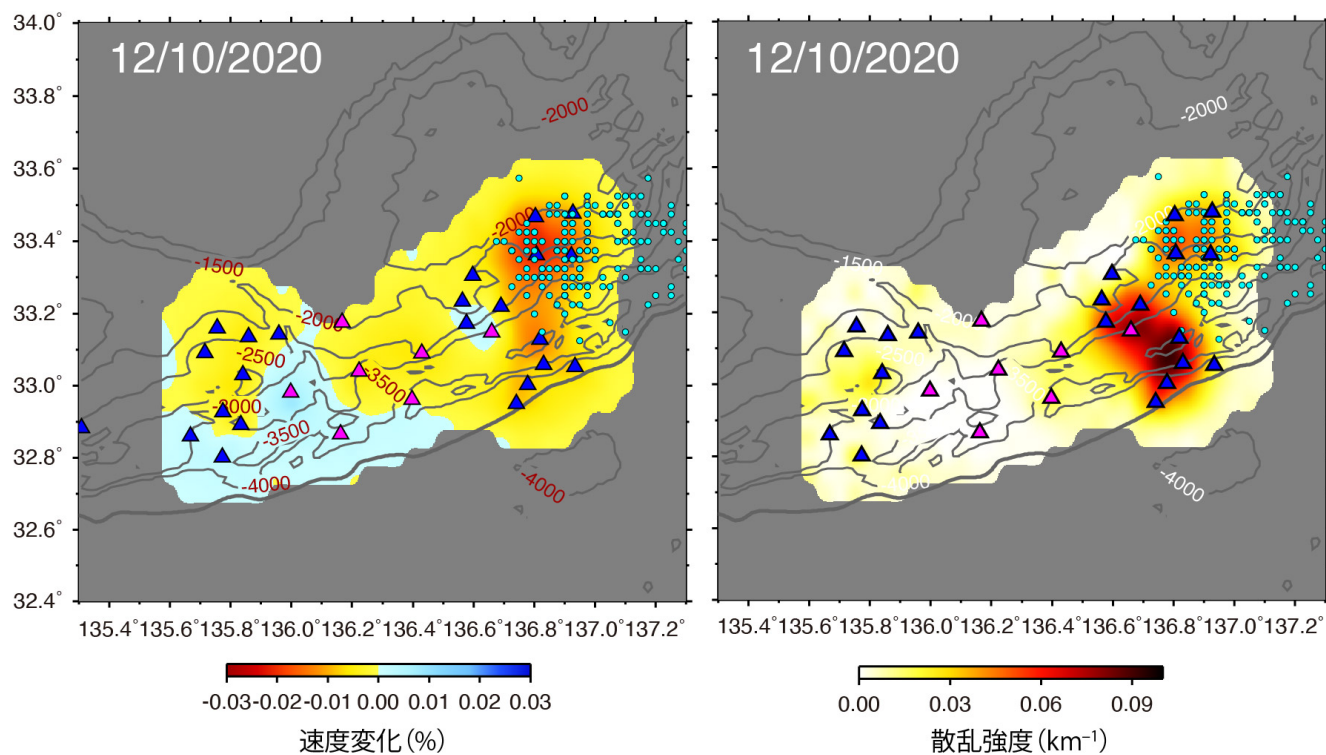


図. (左) 2020年12月10日の速度変化(ただし、時間分解能は30日). (右) 2020年12月10日の不均質構造の変化. リファレンスは2020年9–10月. 水色丸はTakemura et al. 2022による2020年12月10日±5日分の浅部超低周波地震の分布. 青三角はDONET観測点、紫三角は海底地震計を示す.

## Upper-plate structural heterogeneities controlling shallow tremor: Results from active-source seismic surveys in the Hyuga-nada area

\*Ryuta ARAI<sup>1</sup>, Seiichi Miura<sup>1</sup>, Yasuyuki Nakamura<sup>1</sup>, Kazuya Shiraishi<sup>1</sup>, Gou Fujie<sup>1</sup>, Shuichi Kodaira<sup>1</sup>, Tsutomu Takahashi<sup>1</sup>, Ayako Nakanishi<sup>1</sup>, Yuka Kaiho<sup>1</sup>, Yohei Hamada<sup>1</sup>, Yanxue Ma<sup>2</sup>, Kimihiro Mochizuki<sup>2</sup>, Rie Nakata<sup>2</sup>, Masataka Kinoshita<sup>2</sup>, Yoshitaka Hashimoto<sup>3</sup>

1. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Kochi University

南海トラフ西端に位置する日向灘海域では、沈み込み帯浅部において多様なスロー地震活動が発生していることが最近の海底観測で確認されている（Yamashita et al., 2015, 2021; Tonegawa et al., 2020）。これらの地震活動域は九州パラオ海嶺が沈み込む領域にあたっており、沈み込む海山とスロー地震の関係を理解する上で重要な研究対象である。また、九州および種子島の東方沖では海底の陸側斜面に多数の泥火山が存在する（Ujiie, 2000）。こうしたスロー地震や泥火山の発生には地下の流体が密接に関与していると考えられるが、流体の起源や分布、移動様式などには不明な点が多く残されている。

海洋研究開発機構では、南海トラフ全体のプレート沈み込み構造を高解像度で明らかにし、プレート境界断層での多様なすべり現象の発生要因を包括的に理解することを目指した大規模稠密構造探査研究を2018年度から実施している。2020・2021年度には新学術研究領域「スロー地震学」および「日向灘掘削計画」との共同で、日向灘海域において反射法・屈折法探査データを取得した。本発表では主に、海底地震計(OBS)を用いた稠密屈折法探査から得られたP波速度構造に基づき、浅部微動発生域と泥火山近傍の構造不均質について議論する。

鹿児島県東方沖から南海トラフに平行な方向に延びる測線（HYU01）のOBS屈折法データに波形インバージョン解析を適用したところ、上盤プレート内に幅約10kmでP波速度が2.0-4.0km/sの低速度体が複数検出された。測線近傍には泥火山が多数分布することから、この低速度体は上盤プレート内に形成された大規模な破碎帯であり、その内部に透水性の高い流路が発達していると解釈した。低速度体は海底面直下から鉛直方向に深さ10-13kmのプレート境界まで続いており、プレート境界もしくはさらに深部から海底まで流体が上昇してきている可能性を示している。また、破碎帯が上盤プレート内に発達する場所ではスロー地震活動は低調であり、その東側の低速度体（破碎帯）が不明瞭でスロー地震が活発の領域とは対照的である。この特徴は、Nakajima and Hasegawa (2016)が提案している深部微動域とその直上の排水システムとの関係と整合的であり、浅部微動域においても上盤プレートの排水構造がスロー地震の活動域を規定していると考えられる。一方、微動発生域の北東側で交差する測線（HYU03・HYU04）のデータ解析からは、微動活動が低調になる場所に周囲と比べて顕著な高速度体（ $V_p=3.0-5.0\text{km/s}$ ）が存在することがわかった。この高速度体の地質学的な実体は現時点では不明であるが、これら一連の結果から、スロー地震活動と上盤プレートの構造不均質には密接な関係があり、かつスロー地震の活動域を規定する上盤プレートの要因は複数存在すると考えられる。

# Mantle Wedge Anisotropy from Tectonic Tremors beneath the Bungo Channe

\*Motoko ISHISE<sup>1</sup>, Aitaro KATO<sup>1</sup>

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo

## 【はじめに】

Tectonic tremorの発見（Obara, 2002）以来、「スロー地震」と総称される多様な振動現象が世界中の沈み込み帯で確認されている。スロー地震は、プレート境界の巨大地震と同じような発震機構をもち、かつ活動場所がプレート境界型地震の推定震源域と隣接していることから、プレート境界型の巨大地震発生準備過程との関連性が示唆されてきている。そのため、スロー地震の発生メカニズム、活動様式、発生場などについて、現象解明に向けた研究が精力的に進められている。本研究では、南海トラフ沈み込み帯のスロー地震活動のうち、豊後水道における深部低周波地震のエピソードに注目し、その発生場周辺域における地震波異方性構造について検討を行った。

## 【解析方法】

異方性構造の推定には、Ishise & Nishida (2012)のS波スプリッティングパラメータの連続測定法を用いた。一般的なS波スプリッティングパラメータの推定（Ando et al., 1980）では、直達S波1パルス分の水平動2成分のデータからひと組のS波スプリッティングパラメータ（速いS波の振動方向、速いS波と遅いS波の到達時間差）を求める。一方、本解析では、連続波形記録全体に対して事前に設定した時間窓をずらしながらS波スプリッティング解析を連続的に実施し、異方性パラメータを連続的に測定する。今回の解析では、時間窓30秒、時間ステップ15秒としたため、15秒ごとのS波スプリッティングパラメータを得た。また、polarization解析も実施し、波線の入射角と到来方向も求めた。同様の方法によりCascadia地方の地殻異方性が推定されている（Bostock & Christensen, 2012）。

## 【データ】

佐多岬半島にあるN.MISHとN.IKTHのHi-net連続波形記録を使用した。Kato & Nakagawa (2020)によって検出された深部低周波地震活動が、豊後水道から始まり西へ進展したエピソードを含む4期間について、それぞれ1か月分の連続波形記録解析に用いた（2012年5月、2013年10月、2015年1月、2015年9月）。

## 【結果】

いずれの期間・観測点においても、深部低周波地震活動が活発な期間の解析において信頼性の高いS波スプリッティングパラメータが得られた。期間を問わずその値は観測点ごとに安定している：異方性の方向は、両観測点ともに西北西-東南東方向で、N.MISHの方がより東西系に卓越している。時間差については、N.MISHでは0.25~0.3秒付近にピークが見られ、N.IKTHでは0.05秒付近と0.25秒付近の2ヶ所にピークが見られる。

## 【議論・結論】

Cascadiaやメキシコではtectonic tremorのシグナルを用いた異方性推定が行われてきているが（Bostock & Christensen, 2012; Huesca-Perez et al., 2016）、当該地域では先行例がない。そこで、豊後水道下のtremorと波線経路が似ているスラブ内地震を用いて、tremorのシグナルから得られた異方性の妥当性について検討を行った。用いた地震数は、N.MISHが92地震、N.IKTHが83地震である。これらの地震の直達S波を用いたS波スプリッティング解析の結果、スラブ内地震の解析で得られたS波異方性パラメータは、低周波地震の活動時に観測された異方性とよく似た値であった。この結果はtremorシグナルから得られた異方性の妥当性を示唆している。次に、豊後水道下のtremorシグナルやスラブ内地震の解析で得られた異方性が、波線が通過した領域（上部地殻、下部地殻、マントルウェッジ）のうち、どの部分の異方性の特徴を反映しているのかについて検討を行った。上部地殻については、N.IKTH近傍の地殻地震を用いた通常のS波スプリッティング解析の

結果、北西－南東方向に速く、 $<0.025$ 秒の時間差の異方性が得られた。これらの値は、tremorシグナルから得られた方向と大きく異なるうえ、時間差についてもtremorから得られる値の10分の1程度しかない。したがって、上部地殻の異方性の影響は考慮しなくてよいと判断される。下部地殻については、佐多岬半島の深さ25km周辺のP波方位異方性は小さい( $<1\%$ )ことが示されている(Ishise & Oda, 2008)。この場合、S波の異方性もP波と同様に小さいと考えられるため、下部地殻の異方性の影響も小さいと考えられる。よって、tremorシグナルから得られたS波スプリッティングパラメータは、主にマントルウェッジの異方性に起因すると考えられる。さらに、マントルウェッジ内で0.2秒以上の到達時間差が生じる場合の異方性の原因について検討を行った：マントルウェッジ内の伝播距離10km、平均S波速度4km/secとし、到達時間差としてN.IKTHの中央値(0.22秒)を使用した場合、異方性の強さ( $(V_{s_{fast}} - V_{s_{slow}}) / V_{s_{average}}$ )は約9%と見積もられた。この値は一般的な上部マントルの異方性の大きさ(4%程度)と比べて優位に大きく、マントルウェッジの蛇紋岩化が示唆される。当該地域のような低角沈み込み帯のマントルウェッジに蛇紋岩が形成されている場合、これによる異方性の方向はプレートの沈み込み方向と平行となる(プレート等深度線と直交)。この方向は、本研究で観測された異方性の方向と矛盾しない。

謝辞：本研究は、JST, CREST, JPMJCR1763および科研費(20K04099)の支援を受けました。

**Room C | Regular session : S06. Crustal structure**

📅 Mon. Oct 24, 2022 11:00 AM - 12:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 2:00 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM C  
8th floor (Training Room 820)

**[S06] AM-2**

chairperson: Ryuta Arai (JAMSTEC)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

**[S06-05] Shallow crustal structure and slip tendency of bend-faults in the outer rise of the Japan Trench**

\*Yue SUN<sup>1</sup>, Ayumu Miyakawa<sup>2</sup>, Ehsan Jamali Hondori<sup>3</sup>, Jin-oh Park<sup>1</sup> (1. AORI, the University of Tokyo, 2. AIST, 3. GSE)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

**[S06-06] The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling - III**

\*Takaya IWASAKI<sup>1</sup>, Hiroshi SATO<sup>2,3</sup>, Eiji KURASHIMO<sup>3</sup>, Hirokazu ISHIGE<sup>4</sup>, Hidehiko SHIMIZU<sup>5</sup>, Tatsuya ISHIYAMA<sup>3</sup>, Takashi IIDAKA<sup>6</sup>, Masanao SHINOHARA<sup>3</sup>, Shinji KAWASAKI<sup>4</sup>, Susumu ABE<sup>4</sup>, Naoshi HIRATA<sup>3</sup> (1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. JGI, Inc., 5. JOGMEC, 6. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

**[S06-07] An estimation of the crustal reflector in the north Ibaraki area using S-wave later phases**

\*Takahiro SHIINA<sup>1</sup>, Yuta AMEZAWA<sup>1</sup>, Takahiko UCHIDE<sup>1</sup>, Haruo HORIKAWA<sup>1</sup>, Kazutoshi IMANISHI<sup>1</sup> (1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST))

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

**[S06-08] A preliminary report of faults and natural gas layers observed in lowlands of the eastern Tokyo**

\*Tetsuro TSURU<sup>1</sup>, Naoto KUMAGAI<sup>1</sup>, Kazuo YAMAGUCHI<sup>2</sup>, Jinoh PARK<sup>3</sup> (1. TUMSAT, 2. AIST, 3. AORI, The University of Tokyo)

## Shallow crustal structure and slip tendency of bend-faults in the outer rise of the Japan Trench

\*Yue SUN<sup>1</sup>, Ayumu Miyakawa<sup>2</sup>, Ehsan Jamali Hondori<sup>3</sup>, Jin-oh Park<sup>1</sup>

1. AORI, the University of Tokyo, 2. AIST, 3. GSE

沈み込んでいく海洋プレートの性質は、沈み込んだ後に海溝型巨大地震に大きく影響する。実際に、日本海溝付近では、海溝型巨大地震が発生した後に、巨大津波を引き起こすアウターライズ地震が発生した(例えば、1896年明治三陸沖地震と1933年昭和三陸沖地震)。これらの地震の発生様式を解明するために、日本海溝アウターライズの浅部地殻構造を調査することは重要な課題である。そのため、東京大学大気海洋研究所の「可搬式反射法地震探査システム」を学術研究船「新青丸」に搭載し、2019年4月にKS-19-05次航海と2020年9月にKS-20-14次航海でマルチチャンネル反射法地震(Multi-channel seismic; MCS)探査を実施した。MCSデータを処理した結果、岩手沖及び宮城沖の測線では、海底面から下方へ遠洋性堆積物・チャート・音響基盤層(玄武岩)の三つの層から成していることが確認できた。太平洋プレートが日本海溝へ沈み込む際に、プレートの折り曲げにより正断層群が発達し、明瞭なホルスト・グラベン(地壘・地溝)構造が発達している。岩手沖及び宮城沖の両方の測線ともプチスポット火山(Hirano et al., 2006)の存在が確認されている。プチスポット火山と海溝の相対位置によって、正断層の発達パターンが異なっていることが分かった。更に、Hirano et al. (2006)のプチスポット火山Site Aが存在する岩手沖の測線では、海溝軸から海側75 kmの範囲内でチャート層の反射面が消失し、音響基盤層の最上部の反射極性が反転していることが判明した。プチスポット火山の存在によってMCS測線の音響基盤がかく乱されている現象は多数の先行研究でも報告されているが、このように広範囲で均一の反射極性反転が発見されたのは初めてである。この現象をより詳しく調べるため、同海域での他の測線の観測結果を参照する必要がある。本研究では、「新青丸」のMCSデータに加え、JAMSTECが1997年から取得したMCSデータの再処理を行い、日本海溝のアウターライズにおいて広域的な地殻構造の解釈を行っている。

日本海溝アウターライズに発達する正断層群の活動性を評価するため、Morris et al. (1996)で提唱されたSlip tendency ( $T_s$ )を利用する。 $T_s$ は各断層面に作用するせん断応力と垂直応力の比であり、 $T_s$ 値が大きいほど断層は再活動し易く、地震発生リスクも高いことが報告されている。 $T_s$ の計算方法としては、まずYamaji et al. (2006)で提唱された応力インバージョン法を利用し、2012年7月から2022年7月までの岩手沖及び宮城沖のアウターライズで発生した浅部地震の震源メカニズム解を用い断層周辺の応力場を推定する。その後、MCS深度断面図及び海底地形図を利用し断層の方位角及び傾斜角を測定することで、せん断応力と垂直応力を求め、 $T_s$ を計算した。また、断層の開口性を評価するため、Ferrill et al. (1999)で提唱されたDilation tendency ( $T_d$ )を計算した。

予察的な結果として、1) 岩手沖において、他のMCS測線も「新青丸」MCS測線と同様に、広範囲に渡ってチャート層の反射面が消失する現象が確認された。2) 日本海溝アウターライズにおいて、音響基盤が不連続な部分が存在する。音響基盤が断続的にチャート層の上に偏移し、それらの反射波の周波数が低下していることが確認された。この現象は、アウターライズが隆起し始めた場所に多発している。3) 岩手沖及び宮城沖の両方とも西傾斜(海溝方向)を持つ正断層が高い $T_s$ を持つ傾向を示す。これは、この二つの地域において推定された応力場がいずれも最大主応力軸がほぼ鉛直からわずかに東に傾斜し、最小主応力軸が水平からわずかに西に傾斜していることが原因として考えられる。4)  $T_d$ の変化パターンは $T_s$ とほぼ同様に、西傾斜(海溝方向)を持つ正断層で高い $T_d$ を持つ傾向を示している。5) 高い $T_s$ と大きい断層変位と一致しないため、断層変位がそのまま $T_s$ の大きさによるものではないと考えられる。

## The crust and uppermost mantle structure across the central part of the NE Japan Arc revealed from the 2019 onshore seismic refraction/wide-angle reflection profiling - III

\*Takaya IWASAKI<sup>1</sup>, Hiroshi SATO<sup>2,3</sup>, Eiji KURASHIMO<sup>3</sup>, Hirokazu ISHIGE<sup>4</sup>, Hidehiko SHIMIZU<sup>5</sup>, Tatsuya ISHIYAMA<sup>3</sup>, Takashi IIDAKA<sup>6</sup>, Masanao SHINOHARA<sup>3</sup>, Shinji KAWASAKI<sup>4</sup>, Susumu ABE<sup>4</sup>, Naoshi HIRATA<sup>3</sup>

1. Association for the Development of Earthquake Prediction, 2. Shizuoka University Center for Integrated Research and Education of Natural Hazards, 3. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 4. JGI, Inc., 5. JOGMEC, 6. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo

We constructed the whole crustal structure model across the NE Japan from an extensive onshore-offshore seismic expedition, which was undertaken in 2019 from the Yamato bank to the Japan Trench across the central part of the NE Japan arc (Sato et al., 2020a, b). Our main data were acquired on the 150-km long onshore seismic line extending from the Shonai Plain on the coast of the Sea of Japan to the eastern margin of the Kitakami Mountains on the Pacific coast.

First, we revised the previous crustal model by Iwasaki et al. (2021a,b; 2022) from the travel-time analysis using the ray-tracing technique. In the modelling for the crooked part of the profile, “the distance correction (Iwasaki et al., 2021a)” was applied to correct the systematic travel-time shifts arising from the ray-tracing calculation under the simple 2D assumption. This was quite effective, and revealed highly complicated sedimentary structure beneath the western and middle parts of the profile. The structure of lower crust and uppermost mantle were modelled from the first arrivals and later phases at far offsets (>50-60 km). To extract reliable structural information from weak wide-angle reflections, we applied the stacking method to the original seismic records, and carried out intensive travel-time analysis both for the original and stacked seismic sections.

Next, synthetic seismograms was computed based on the asymptotic ray theory. We also included the above-mentioned distance correction, and compared with the observed records. This amplitude calculation showed inadequateness of modelling only from the travel-time data, and could refine the geometry and velocity contrast at layer boundaries within the sedimentary part, and constrain several velocity discontinuities existing in the middle/lower crust and uppermost mantle.

The obtained model at the present stage has the following features.

- (1) The uppermost part crust consists of 4 layers of  $V_p$  = 1.6-2.0, 1.8-3.5, 3.7-5.0 and 4.5-5.5 km/s, representing sedimentary and volcanoclastic rocks. Their geometry shows significant change along the profile line, well correlated with fault and caldera systems developed in the surveyed region under successive tectonic processes in the NE Japan arc.
- (2) The velocity of the crystalline upper crust is 5.8-6.1 km/s, but show higher values of 6.0-6.25 km/s in the eastern end of the profile (in the Kitakami Mts.), well consistent with the previous refraction wide-angle reflection studies (Iwasaki et al., 1994, 2001).
- (3) The thickness of the middle crust is 5-7 km with a velocity of 6.4-6.5 km/s. The lower crust is composed of three layers with velocities ranging from 6.6 to 7.1 km/s. This part is generally reflective with less seismic activity.

- (4) The Moho is situated at 30.5-32 km depth. The Pn velocity is about 7.7 km/s. At the bottom of the lowermost crust, there may exist a 2-km thick transition zone (7.1-7.4~7.5 km/s). Hence, the resultant velocity contrast at the Moho is only 0.2~0.3 km/s.
- (5) The uppermost part of the mantle is also reflective, which contains two velocity discontinuities with a contrast of 0.1~0.2 km/s at depths of 38 and 46 km.
- (6) Low frequency earthquakes are occurring at depths of 17-40 km, just within the reflectivity zones in the lower crust and uppermantle found from the present study.
- (7) Gross structural features (velocity values and crustal thickness) are well consistent with those from the tomographic analyses by Kurashimo et al. (2021, 2022).

### References

- Iwasaki et al., 1994. *J. Geophys. Res.*, **99**, 22187-22204.
- Iwasaki et al., 2001. *Geophys. Res. Letters*, **28**, 2329-2332.
- Iwasaki et al., 2021a. 2021 JpGU Meeting, SCG49-05.
- Iwasaki et al., 2021b. Program and Abstract of the 2021 Fall Meeting of Seismological Society of Japan, S06-03.
- Iwasaki et al., 2022. 2022 JpGU Meeting, SCG50-04.
- Kurashimo et al., 2021. 2021, JpGU Meeting, SCG49-04.
- Kurashimo et al., 2022. 2022, JpGU Meeting, SCG50-03.
- Sato et al., 2020a. 2020 JpGU-AGU Joint Meeting, MIS03-P05.
- Sato et al., 2020b. 2020 Spring Meeting of JAPT, 016.

## An estimation of the crustal reflector in the north Ibaraki area using S-wave later phases

\*Takahiro SHIINA<sup>1</sup>, Yuta AMEZAWA<sup>1</sup>, Takahiko UCHIDE<sup>1</sup>, Haruo HORIKAWA<sup>1</sup>, Kazutoshi IMANISHI<sup>1</sup>

1. Geological Survey of Japan, National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST)

2011年東北地方太平洋沖地震以降、茨城県北部および福島県浜通りでは地殻内地震の活動が活発化している。これらの地域では深さ10 km以浅の活動に加えて、地殻内地震の発生深度としてはやや深い、深さ15-20 kmでも地震の発生が確認されている。また、この深さ付近ではS波反射面が存在することを指摘している[臼田・他, 2020, JpGU].

産業技術総合研究所地質調査総合センター（GSJ）では2016年6月から茨城県北部で臨時観測網を展開し、地震観測を実施している。この臨時観測網は茨城県常陸太田市・高萩市にまたがって、5 km程度の間隔で設置された7つの観測点で構成される。この臨時観測網においても、S波反射と解釈される明瞭な後続波が観測された[椎名・他, 2022, JpGU]. そこで本研究ではGSJ臨時観測網および周辺の定常地震観測網において観測される地殻内地震のS波反射波を用いて、特に茨城県北部下において、地殻内部に存在するS波反射面の詳しい分布を検討した。

本研究ではまず、茨城県北部および福島県浜通り付近で発生した地震の震源位置と同地域の1次元速度構造の推定を行った。解析には、2003年から2021年に発生したマグニチュード3.5-4.5の地震767個を用い、P波およびS波の到着時刻を手動で検出した。これらの地震の発生深度は0-30 kmである。震源位置と1次元速度構造はShiina and Kano [2022, GJI]の手法により再決定した。次に、GSJ臨時観測点および周辺のHi-net観測点（N.THGH, N.KIBH/N.KI2H, N.JUOH）でS波反射波を同定し、その到達時刻を読み取った。ここでは2016年6月以降に発生した地震50個を対象とした。観測波形からS波反射波に対応する振幅増加区間を読み取り、その中央時刻をS波反射波到達時刻として扱う。この値はS波反射波の最大振幅の到達時刻におおよそ一致する。そのうえで、事前に決定した震源位置と速度構造のもと、MCMC法（マルコフ連鎖モンテカルロ法）を用いてS波反射波の到達時刻を説明する反射面の分布を推定した。

結果として、深さ13 km程度を上端とし、ほぼ北落ちに30度程度の傾斜を持つ反射面が茨城県北部地域下に存在することが示唆された。このような反射面は同地域の地殻内地震活動と相補的な分布であるとともに、臼田・他 [2020]の結果におおむね整合する。臼田・他 [2020]は逆VSP解析に基づくイメージング結果から地殻内反射面の分布を解釈しているのに対し、本研究ではS波反射波の到達時刻から直接反射面の推定を行っている。したがって、本研究の結果はより精緻な地殻内反射面のモデルを与えるものであろう。また、推定した反射面は低速度[e.g., Tong et al., 2012, Solid Earth]かつ低比抵抗[Umeda et al., 2015, JGR]な領域の直上に位置する。以上から、茨城県北部地域の下部地殻付近には強い不均質構造が存在し、それがS波反射波の励起に大きく寄与していることが推察される。

謝辞：本研究では気象庁一元化震源カタログおよび防災科学技術研究所Hi-netの観測波形データを使用しました。また、本研究は文部科学省の情報科学を活用した地震調査研究プロジェクト（STAR-Eプロジェクト）[JPJ010217]ならびにJST CREST [JPMJCR1763]の支援をいただきました。記して感謝申し上げます。

## A preliminary report of faults and natural gas layers observed in lowlands of the eastern Tokyo

\*Tetsuro TSURU<sup>1</sup>, Naoto KUMAGAI<sup>1</sup>, Kazuo YAMAGUCHI<sup>2</sup>, Jinoh PARK<sup>3</sup>

1. TUMSAT, 2. AIST, 3. AORI, The University of Tokyo

### 1. はじめに

反射法地震探査は地下の構造形態を高精度に映像化する手法として、地殻構造探査や石油探査分野で広く使用されている。著者らは海洋生態系への環境負荷を抑制しつつ、船舶が輻輳する海域でも実施できる地震探査システムの開発に取り組んでいる。システムの特徴は、非パルス波振源である水中スピーカーを利用する小型の探査システムであり、これまで、東京湾などでの海上試験において、二次元地震探査データの取得および三次元データ取得実験を実施した。

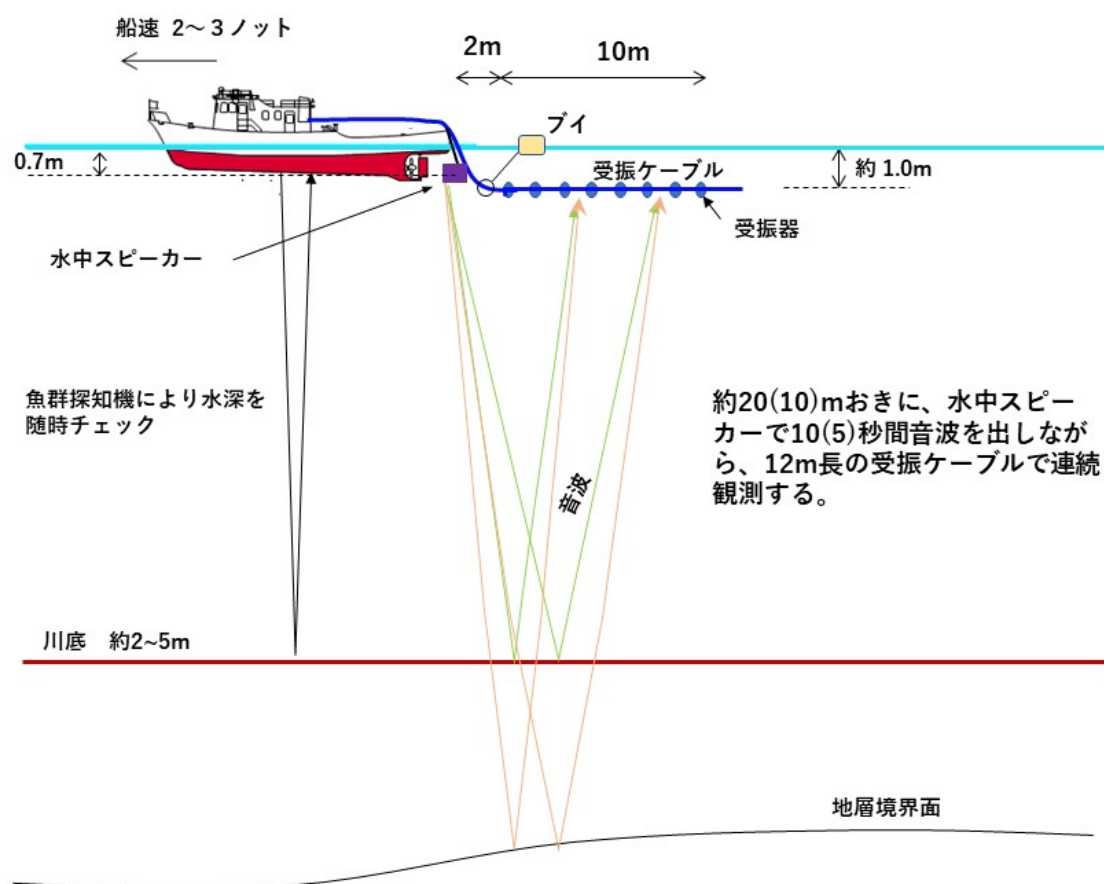
東京湾における地震探査の結果、海底下78mに分布するガス層（以下、海底ガス）や断層に封鎖されたガス層（断層トラップ）が発見された（Tsuru et al. 2019; 鶴ほか, 2021, JAPT）。海底ガスは、北は浦安沖、南は東京湾アクアライン付近まで連続して分布している。また、一部の断層は海底面を切っているように見える。

### 2. 河川での反射法地震探査

海底ガスの北限を調査するため、2021年11月に荒川河口から約5km遡上しつつ反射法地震探査を行った。その結果、ガス層は河口付近で一旦途切れるものの断層近傍で分布することが示唆された（Tsuru et al., 2021, JpGU）。そこで、2022年6月、更なる地震探査を隅田川、荒川、新中川および旧江戸川の下流域で実施した。その結果、全ての河川で明瞭な断層とそれらの近傍に分布するガス層の存在が確認された。発振周波数帯域などの違いにより、隅田川と荒川で取得された反射断面図では川底からの反射波の特定が困難であったものの、新中川および旧江戸川の反射断面上では、川底まで変位が達しているように見える断層もいくつか存在する。

### 3. 考察

比較的落差の大きな断層をマッピングすると、荒川断層と東京湾北部断層の延長部に挟まれたエリアおよびその周辺に分布しているものが多い。また、過去に建設工事中にメタンガスが湧出した場所も、同様のエリアに多く分布している。以上のことから、これら2つの断層は東京の下町低地まで延長している可能性があり、それらに挟まれたエリアおよびその周辺では、断層に沿って地下からメタンを含む流体が上昇している可能性があると考えられる。



調査期間: 2022.06.02~2022.06.03, 船舶: 第三網弁丸 3.9トン

**Room C | Regular session : S06. Crustal structure**

📅 Mon. Oct 24, 2022 4:00 PM - 5:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 7:00 AM - 8:00 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S06] PM-2**

chairperson: Takashi Tonegawa (JAMSTEC)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S06-09] Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm in the Noto Peninsula, central Japan

\*Tomomi Okada<sup>1</sup>, Martha Savage<sup>2</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup>, Keisuke Yoshida<sup>1</sup>, Naoki Uchida<sup>4</sup>, Ryota Takagi<sup>1</sup>, Shuutoku Kimura<sup>1</sup>, Satoshi Hirahara<sup>1</sup>, Toru Matsuzawa<sup>1</sup> (1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington, New Zealand, 3. The Interfaculty Initiative in Information Studies, University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[S06-10] Detailed structure of the uppermost part of the Philippine Sea Plate beneath the Kii Peninsula

\*Katsuhiko Shiomi<sup>1</sup> (1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience)

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[S06-11] Spatial variations and causes of fracture structure in and around Hakone volcano

\*Ryou HONDA<sup>1</sup>, Yuki Abe<sup>1</sup>, Yohei Yukutake<sup>2</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup> (1. Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo)

4:45 PM - 5:00 PM JST | 7:45 AM - 8:00 AM UTC

[S06-12] Seismic velocity structure beneath Kikai-caldera, Japan, from seismic refraction survey

\*Akihiro Nagaya<sup>1</sup>, Gou Fujie<sup>2</sup>, Shuichi Kodaira<sup>2</sup>, Satoru Tanaka<sup>2</sup>, Yojiro Yamamoto<sup>2</sup>, Hiroko Sugioka<sup>4,1</sup>, Hiroki Miyamachi<sup>3</sup>, Tetsuo Matsuno<sup>4</sup>, Hironori Otsuka<sup>4</sup>, Keita Suzuki<sup>4,5</sup>, Nobukazu Seama<sup>1,4</sup> (1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 4. Ocean Bottom Exploraiton Center, Kobe University, 5. Nippon Marine Enterprises, Ltd)

# Shear wave splitting and seismic velocity structure in the focal area of the earthquake swarm in the Noto Peninsula, central Japan

\*Tomomi Okada<sup>1</sup>, Martha Savage<sup>2</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup>, Keisuke Yoshida<sup>1</sup>, Naoki Uchida<sup>4</sup>, Ryota Takagi<sup>1</sup>, Shuutoku Kimura<sup>1</sup>, Satoshi Hirahara<sup>1</sup>, Toru Matsuzawa<sup>1</sup>

1. Research Center for Prediction of Earthquakes and Volcanic Eruptions, Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Victoria University of Wellington, New Zealand, 3. The Interfaculty Initiative in Information Studies, University of Tokyo, 4. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

## 1. はじめに

石川県能登地方では、2020年8月ごろから地震活動が活発化し、2022年8月時点でも継続している。地震活動の活発化の原因としては、地下の変動源による応力変化と流体圧の上昇などが考えられている。本研究では震源域に設置した臨時観測点および定常観測点を用いたS波スプリッティング解析により、S波偏向異方性について検討を行った。また、地震波速度トモグラフィ解析により、震源域の地震波速度構造について検討を行った。

## 2. 手法・データ

S波スプリッティングについて、本研究では、Silver and Chan (1991)を基としたMFAST (Savage et al., 2010)を使用した。MFASTでは、様々な位置や長さの時間窓による解析結果のクラスター分析を行う。そのことでS波偏向異方性を安定にかつ高速に推定することができると期待される。

データは、2022年6月末から震源域に設置した臨時観測点および定常観測点による波形データを用いた。地震計は短周期地震計（固有周波数：1Hzまたは2Hz）、または広帯域地震計である。サンプリング周波数は100Hzである。

地震波速度構造について、手法は、ダブルディファレンストモグラフィ法（Zhang and Thurber, 2003, 2006）を用いた。2020年2月～2022年7月までの1648個の地震を解析に用いた。

## 3. 結果

### S波偏向異方性の空間分布

異方性の卓越方向は概ね東西方向と南北方向に推定された。東西ないし北西-南東方向の異方性は、最大水平圧縮軸方向と概ね一致する。したがって、応力による異方性が観測された東西方向の異方性の原因として考えられる。一方、概ね東西方向と南北方向の走向を持つ断層が確認されており、構造的な異方性を見ている可能性も考えられる。

### S波偏向異方性の時間変化

定常観測点の一つである、N.SUZHについて、異方性の時間変化を検討した。異方性の方向については、顕著な時間変化は見られなかった。異方性の大きさについては、2021年の6～9月ごろ以降の期間において、それ以前の期間に比べて、特に震源域の西部での活動に対し、大きな異方性が観測された可能性がある。

### 地震波速度構造

震源域深部、深さ18kmに高いVp/Vs領域を確認した。この領域では周囲と比べて、やや大きなP波速度が得られた。対象領域には第三紀の火成岩が分布していることから、高いVp/Vs領域は古いマグマだまりを示している可能性があり、そこから放出された（あるいはそこを経由した）流体がこの群発地震活動に関わっていることを示唆する。

### 議論

この地震活動は、比較的断層構造の発達した未熟な応力性の異方性が分布し、深部に流体を示唆する高いVp/Vsの領域が確認される南部より活動が開始した。その後、断層構造が発達している構造的な異方性が分布する北部での活動が活発となった。

## Introduction

Seismic activity in the Noto region of Ishikawa Prefecture has increased since August 2020 and has

continued as of August 2022. Stress changes due to subsurface sources and increases in fluid pressure are discussed as the causes of the seismic activity increase. In this study, S-wave polarization anisotropy was investigated by S-wave splitting analysis using temporary and permanent stations located in the epicenter area. We also investigated the seismic wave velocity structure in the source region by analyzing seismic wave velocity tomography.

#### Methodology and Data

In this study, we used MFAST (Savage et al., 1990), based on Silver and Chan (1991); MFAST performs a cluster analysis of the analysis results by time windows of various locations and lengths. MFAST is expected to provide a stable and fast estimation of S-wave polarization anisotropy. The data were waveform data from permanent and temporary stations set up in the epicenter area since June 2022. The seismographs were short-period seismographs (natural frequency: 1 Hz or 2 Hz) or broadband seismographs. The sampling frequency was 100 Hz. For seismic tomography analysis, the double-difference tomography method was used (Zhang and Thurber, 2003, 2006). We used 1648 earthquakes from February 2020 to July 2022 for the analysis.

#### Results

##### Spatial distribution of S-wave polarization anisotropy

The directions of anisotropy were generally in the east-west and north-south directions. The east-west or NW-SE anisotropy generally coincides with the direction of the maximum horizontal compression axis. Therefore, stress-induced anisotropy can be the cause of the observed east-west anisotropy. On the other hand, faults with strike directions generally east-west and north-south have been identified, and structural anisotropy may be another cause.

##### Time variation of S-wave polarization anisotropy

We examined the time variation of anisotropy at N.SUZH, one of the permanent stations. No significant time variation was observed in the direction of anisotropy. Larger anisotropy was observed, particularly for the activity in the western part of the focal area, from about June-September 2021 compared to the period up to that period.

##### Seismic velocity structure

A high  $V_p/V_s$  region was identified beneath the focal area, at a depth of 18 km. This high  $V_p/V_s$  region has slightly larger P-wave velocities than the surrounding area. Since Tertiary igneous rocks are distributed in the target area, the high  $V_p/V_s$  region may represent an old magma reservoir, suggesting that fluids released from (or through) the magma reservoir are involved in this seismic swarm.

#### Discussion

This seismic activity started in the southern part of the area, where relatively immature fault structure development, stress anisotropy is distributed, and high  $V_p/V_s$  regions suggestive of fluid at depth are identified. Subsequently, activity became more active in the northern part, where structural anisotropy with well-developed fault structures is distributed.

## Detailed structure of the uppermost part of the Philippine Sea Plate beneath the Kii Peninsula

\*Katsuhiko Shiomi<sup>1</sup>

1. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience

### はじめに

紀伊半島は南海トラフ沿いで発生する海溝型巨大地震の震源モデルを検討する上で極めて重要な地域である。Shiomi & Park (2008, doi: 10.1029/2007JB005535) は、紀伊半島内の防災科研Hi-net/F-net各観測点で得られたレシーバ関数 (RF) のスタックから、フィリピン海プレート内海洋モホ面の位置や傾斜方向を推定し、スラブ内で発生する地震活動やテクトニック微動活動との関係を議論した。その後、様々な機関による観測データの蓄積も進み、解析に使用できる遠地地震データが格段に増加した。本研究では、紀伊半島内に設置された各機関の観測点で得られたRFにHarmonic Decomposition解析法 (HD法, e.g., Bianchi *et al.*, 2010, doi: 10.1029/2009JB007061) を適用することにより、観測点下の海洋モホ面の傾斜方向分布をより高精度かつ高密度に把握するとともに、海洋地殻相当深さ付近における異方性構造を推定し、その特徴について検討を行った。

### データ・解析方法

解析には、紀伊半島及びその周辺に設置された防災科研Hi-net/F-netに加え、大学、気象庁、産業技術総合研究所の地震計並びに国土交通省による振動センサーで収録された遠地地震 (M5.8) による波形記録を用いた。自動あるいは目視によりS/Nの悪い波形を除去したのち、観測波形に1.0 Hzの低域通過フィルタを適用し、RFを推定した。各観測点で得られたRFから顕著な正の振幅を有する変換波を抽出し、Matsubara *et al.* (2019, doi: 10.5772/intechopen.86936) による地震波速度構造に基づき、この変換波が励起された速度不連続面の深さを求めた。解析対象とした地震波速度不連続面は太平洋岸から内陸部に向かって深くなる傾向が見えることから、フィリピン海プレート内海洋モホ面と判断した。変換面の深さ分布は、既存のモデル (e.g., Shiomi *et al.*, 2008, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03786.x) と矛盾しない。次に各観測点で求めた海洋モホ面深さを対象としてHD法を適用し、調和成分の抽出を行った。この際、各観測点で得られたRFに対して500回のブートストラップ抽出を行い、その結果から平均値ならびに標準偏差 $\sigma$ を求めた。各抽出に対するHD法の結果において、非モデル成分のRMS振幅がモデル成分のRMS振幅よりも大きい場合、その結果は不採択とした。500回の抽出を経ても200回の採択結果が得られない観測点及び200回の採択が得られても $\pm 2\sigma$ が45度を超える観測点は「結果不安定」とした。なお、モホ面傾斜方向の推定には調和成分の1次項 ( $k=1$ ) の $-0.2 \sim 0.2$ 秒、海洋地殻相当層の異方性の特徴推定には2次項 ( $k=2$ ) の $-0.7 \sim -0.3$ 秒を対象とした粒子軌跡の主軸方位を用いた。

### 結果

海洋モホ面傾斜分布から、紀伊半島は大きく以下の4つの領域に分割可能であった：①北東傾斜を示す和歌山県南部～三重県南部地域。②北傾斜を示す和歌山県北部～奈良県南部地域。③北西傾斜を示す三重県中部～奈良県北部地域。④結果不安定な観測点が集まる三重県北部地域。領域①のうち、和歌山・三重県境付近に位置するE.KTUでは北西傾斜、E.HGUでは南東傾斜と、周辺とは異なる方位を示した。この2点を結ぶ直線の北西延長部には深部微動のギャップが位置するほか、スラブ内地震活動度が変化する場所とも対応しており、何らかの微細な構造的特徴を検出した可能性がある。一方、領域①の北端部は和歌山県内で発生する深部微動域の南端と一致するが、領域③では深部微動活動域とそれ以外で傾向の変化は見られない。領域④では近接する5観測点で結果不安定となったが、Shiomi *et al.* (2008) を見ると、この地域のスラブの等深線間隔はやや広く、スラブがほぼ平坦になっている可能性が考えられる。海洋地殻相当層の異方性構造は、深部微動域よりトラフ軸側では概ねスラブ等深線と平行に速い軸が分布する。深部微動域直下からdown-dip側を見ると、三重県北部～奈良県北部では引き続き北東－南西方向に速い軸を持つ分布が見られるが、奈良県南部～和歌山県北部

では南北方向を中心に，結果がばらつく傾向にある．プレートが湾曲している影響を受けている可能性も考えられるが，速い軸の方位がばらつく領域はスラブ内地震の活動域が海洋地殻から海洋マントル内に遷移する領域と概ね対応しており，スラブ内の鉱物の組成変化を捉えている可能性もある．

**謝辞：**本研究を実施するにあたって，気象庁，東大地震研，京大防災研，産総研，国土交通省による観測データを使用いたしました．記して感謝致します．

## Spatial variations and causes of fracture structure in and around Hakone volcano

\*Ryou HONDA<sup>1</sup>, Yuki Abe<sup>1</sup>, Yohei Yukutake<sup>2</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup>

1. Hot springs research institute of Kanagawa prefecture, 2. Earthquake Research Institute, Univ. of Tokyo, 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, The University of Tokyo

1.はじめに 箱根火山のカルデラ内には、古い亀裂やダイク、微小亀裂などの多くの割れ目や亀裂が存在する。そのような既存の割れ目系は、マグマや熱水が侵入する経路として利用され、地震活動の活発化や水蒸気噴火の際の地殻変動の原因となっている可能性がある。我々はこれまでも、S波スプリットングと呼ばれる現象を利用して地下の亀裂系についての研究を行ってきたが (Honda et al., 2014)、本研究ではFuzzy C-means法と呼ばれる手法を用いて地下の亀裂系の方位についてクラスタリングを実施して、箱根火山の亀裂系の特徴を明らかにした。2. 解析手法 本研究では亀裂系の詳細な空間分布を推定するため、2016年から2017年にかけて箱根火山及びその周辺で実施した機動観測のデータを利用した。まず、S波スプリットングの解析を行い、各観測点での速いS波の振動方向 (LSPD) のデータを集める。この振動方向が観測点直下の亀裂系の方向に相当する。ただし、機動観測点の場合はセンサーの設置方位の誤差が大きいと考えられることから、事前に遠地地震の波形を用いて方位の修正を行った。次に、観測点ごとに異方性の強度などで重みづけしたLSPDの平均を計算し、最後にFuzzy C-means法を用いて平均LSPDのクラスタリングを実施した。3. 結果 Fuzzy C-means法ではクラスター数を任意で与えるため、クラスターの数を変化させて、いくつかのクラスターに分けるのが尤もらしいか調べた。その結果、箱根カルデラの亀裂系は2つのクラスター (AおよびB) または4つのクラスター (A1、A2、B1、およびB2) に分類できることが分かった。B1はおおむね中央火口丘付近、B2はカルデラの南北、A1、A2はカルデラ西部もしくはカルデラ周辺に分布する。

広域応力場の圧縮軸の方向に対応する北西-南東方向の亀裂系が卓越するクラスター (B1) は、広域応力場によって掲載された微小な亀裂系やダイクの存在を示していると考えられ、古い火口の配列方向ともよく一致している。クラスターB2は、箱根カルデラの南北に存在する丹那断層および平山断層の走向に近い方向を持つクラスターであり、これらの断層の断層破碎帯が存在することを示唆している。クラスターA1、A2はB2の共役系 (B2と直交する走向をもつ断層) で説明できる可能性があるが、局所的な応力場による微小亀裂の配列や古い火山構造もこのようなクラスターの原因となりえる。例えば、Doke et al (2020)では、箱根の西側における歪の圧縮軸は、北西南東よりもやや東西寄りの方向を向いていることが示されており、このような局所的な応力場によって形成された亀裂系が存在している可能性もある。

## Seismic velocity structure beneath Kikai-caldera, Japan, from seismic refraction survey

\*Akihiro Nagaya<sup>1</sup>, Gou Fujie<sup>2</sup>, Shuichi Kodaira<sup>2</sup>, Satoru Tanaka<sup>2</sup>, Yojiro Yamamoto<sup>2</sup>, Hiroko Sugioka<sup>4,1</sup>, Hiroki Miyamachi<sup>3</sup>, Tetsuo Matsuno<sup>4</sup>, Hironori Otsuka<sup>4</sup>, Keita Suzuki<sup>4,5</sup>, Nobukazu Seama<sup>1,4</sup>

1. Department of Planetology, Graduate School of Science, Kobe University, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology, 3. Graduate School of Science and Engineering, Kagoshima University, 4. Ocean Bottom Exploraiton Center, Kobe University, 5. Nippon Marine Enterprises, Ltd

鬼界カルデラは鹿児島県薩摩半島の南部約60 kmに位置する海底火山であり、過去に噴火を繰り返してきた。その中でも最も直近の噴火である鬼界-アカホヤ噴火は7300年前に発生した日本列島で最も新しい巨大なカルデラ噴火である。2016年~2017年に神戸大学「深江丸」によって行われた探査航海により、二重のカルデラ構造や、熱水活動などが明らかになり、カルデラ噴火以降に成長した溶岩ドームの下にマグマ溜まりの存在が示唆されている(Tatsumi et al., 2018)。また、火山ガスやメルト包有物の研究(Kazahaya et al., 2002)によって、地下のマグマ溜まりのモデルが提案されている。一方で、そのモデルを検証できるような地震波速度構造は、これまで推定されていなかった。

そこで、2021年7月19日~8月1日に海洋研究開発機構の海底広域研究船「かいめい」を用いたKM21-05航海では屈折法地震探査が実施された。本研究では、探査によって得られたOBSデータに初動走時トモグラフィ解析(Fujie et al., 2006, 2013)を適用し、鬼界カルデラ地下の二次元P波速度構造を推定した。初動走時トモグラフィ解析には、38台の海底地震計(OBS)の鉛直成分のデータから読み取った約12,200個の初動走時を使用した。

初動走時トモグラフィ解析の結果、鬼界カルデラを東北東-西南西方向に横切る測線直下のP波速度構造が得られた。鬼界カルデラ周辺には速度構造の特徴が異なる四つの構造が見られた。一つ目はカルデラ壁両側近傍(測線西端からの距離40 km~80 km、105 km~115 km)直下で、P波速度5.5 km/sの等値線が深さ3 km~4 kmまで盛り上がっている構造である。二つ目は測線西部(測線西端からの距離0 km~25 km)直下で、深さわずか4 kmでP波速度が6 km/sに達する大きい速度勾配である。三つ目は測線東部(測線西端からの距離115 km~175 km)直下、深さ約2 kmにおいて5 km/sであるP波速度が深さ約7 kmで5.5 km/sまで増加する、緩やかな速度勾配である。上述した三つの構造は、本研究の測線と交差するECr11測線(Nishizawa et al. 2019)の地震波速度構造にも見られた。特筆すべきは四つ目の構造である。鬼界カルデラ(測線西端からの距離80 km~100 km)直下の深さ3 kmから8 kmにおけるP波速度は、周囲より0.5 km/s~1 km/s遅く、その水平方向の広がりには約25 kmに達する。この構造はECr11測線の速度構造には見られず、この火山特有の構造を反映していると考えられる。これらの特徴は複数の初期構造を与え、初動走時トモグラフィ解析を行った場合でも、同様の構造が再現された。また、チェッカーボード解像度テストによって、最終的な速度構造の空間分解能の評価を行い、深さ10 kmまでは水平方向15 km、垂直方向5 kmの空間分解能があり、深さ5 kmまでは水平方向7.5 km、垂直方向2.5 kmの空間分解能があることを確認した。以上のように、構造的特徴の再現性、空間分解能の評価から、鬼界カルデラ直下の深さ約3 km~8 kmには、周囲よりも5%~10%地震波速度が遅い領域が存在することが明らかになった。

**Room C | Regular session : S19. Seismology, general contribution**

📅 Mon. Oct 24, 2022 5:15 PM - 6:00 PM JST | Mon. Oct 24, 2022 8:15 AM - 9:00 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S19] PM-3**

chairperson: Keisuke Onodera (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo)

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[S19-01] Room Seismic Intensity measurement by a ultra compact seismometer

\*Naoshi HIRATA<sup>1</sup>, Takashi FURUYA<sup>2</sup>, Hiroshi TSURUOKA<sup>1</sup> (1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. ISAD)

---

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S19-02] Estimation of the sources of primary microseisms excited by typhoons around Japan

\*Hiroki Kawakami<sup>1</sup>, Naoki Suda<sup>1</sup> (1. Hiroshima University)

---

5:45 PM - 6:00 PM JST | 8:45 AM - 9:00 AM UTC

[S19-03] Introduction of NASA's Titan Exploration Mission: Dragonfly – For the first seismic investigation on an icy moon–

\*Keisuke Onodera<sup>1</sup>, Hiroaki Shiraishi<sup>2</sup>, Satoshi Tanaka<sup>2</sup>, Taichi Kawamura<sup>3</sup>, Takefumi Mitani<sup>2</sup>, Hideki Murakami<sup>4</sup>, Ryuhei Yamada<sup>5</sup>, Shunichi Kamata<sup>6</sup>, Jun Kimura<sup>7</sup>, Hiroyuki Kurokawa<sup>8</sup>, Kiwamu Nishida<sup>1</sup>, Yasuhito Sekine<sup>8</sup>, Takeshi Tsuji<sup>9</sup>, Ralph Lorenz<sup>10</sup> (1. ERI/The University of Tokyo, 2. ISAS/JAXA, 3. IPGP, 4. Kochi University, 5. The University of Aizu, 6. Hokkaido University, 7. Osaka University, 8. Tokyo Institute of Technology, 9. School of Engineering/The University of Tokyo, 10. Johns Hopkins University)

## Room Seismic Intensity measurement by a ultra compact seismometer

\*Naoshi HIRATA<sup>1</sup>, Takashi FURUYA<sup>2</sup>, Hiroshi TSURUOKA<sup>1</sup>

1. ERI, Univ. of Tokyo, 2. ISAD

### はじめに

一般家庭の壁にある電源コンセントに差し込むだけ、固定して室内の揺れ（室内震度）を計測し、インターネット経由で波形データ、計測震度などの情報を収集するシステムを開発した。この仕組みによって、一般家庭、事務所などの地震にいる揺れを「計測震度」によって知り、防災行動に結びつくかどうかの実験を神奈川県座間市、東京都新宿区、千葉県成田市などで実施した。

### システム

一般消費者用のMEMS、WiFiを搭載した基盤搭載コンピュータ（Raspberry Pi）と、AC/AD変換電源を容器に詰め一体化し、家庭用の100Vコンセントに差し込めるようにした（コンセント差し込み方式小型地震計）。この地震計から、データがWiFi経由で、3成分100Hzの加速度連続記録、最大加速、計測震度値などをデータサーバーに転送される。さらに、解析サーバー経由で、Webで閲覧可能な情報として、3成分加速度波形、1 Hzにデシメーションした3成分ベクトル合成包絡波形、PGA、計測震度（室内震度）が提供される。

### 計測実験

2021年9月から2022年3月まで、神奈川県座間市で、一般市民20人に対して、10人には本システムを設置し、10人には設置せずに、有感地震時の揺れの体感（体感震度）や防災行動に関するアンケート調査を実施した。また、東京都新宿区の高層ビル、千葉県成田市の事業所ビルにも同様の装置を設置し、室内震度を計測した。

### 測定結果

室内の揺れを、計測震度を計算するのと同じアルゴリズムで測定すると、一階での測定では、基本的に最寄りの気象庁震度と同様な値が得られた。しかし、数百m程度離れた場所でも、震度階級1程度の増減があることが分かった。さらに、高層ビルの場合には、低層階と高層階で計測震度は異なり、高層階ほど大きくなることも確かめられた。

### アンケート調査結果

地震計を設置した被験者と設置しない被験者とで、防災意識に差がでることを期待した実験であったが、今回の調査では顕著な差は現れなかった。対象者が少なかったことと、有感地震数、特に、大震度の揺れが少なかったことが原因と考えられる。今後、実験の規模を大きくして継続する。

### まとめ

室内で勘弁に設置できる揺れの測定装置を開発して、一般市民の防災意識の向上に貢献するためのシステム作りをはじめた。現状では、データが不足しているが、比較的近隣の場所、階によって、計測震度が異なることは示せた。今後は、データ数を増して、統計的に意味のあるデータを取得する。

# Estimation of the sources of primary microseisms excited by typhoons around Japan

\*Hiroki Kawakami<sup>1</sup>, Naoki Suda<sup>1</sup>

## 1. Hiroshima University

地震計に記録されるバックグラウンドノイズのうち、およそ0.05-0.1Hzの周波数帯の振動はprimary microseismsと呼ばれ、沿岸域における海洋波と海底地形のカップリングにより発生すると考えられている。特に台風が接近した際には、強力な大気エネルギーにより海洋波が励起され、その結果primary microseismsが強く励起されることが知られている。台風が接近した際のprimary microseismsの震源を推定した研究はこれまでも行われているが、日本へ接近した台風によって励起されたprimary microseismsの震源を系統的に調べた研究は報告されていない。本研究では、2011年から2020年の10年間に発生した台風について、励起されたprimary microseismsの震源推定を行った。

地震波のデータにはF-netの広帯域地震計記録を使用した。観測点ごとに1時間平均のパワースペクトルを作成し、primary microseismsのピークが明瞭な観測点を選択して解析に使用した。台風のデータは気象庁で公開されている「過去の台風情報」を参照した。2011年から2020年の10年間で日本列島に接近した最大風速33 m/s以上の強い台風15個を対象とし、台風が接近した期間の記録を解析した。1時間間隔で台風の位置を特定するため、大気圧データとして京都大学のMSM再解析数値予報データを使用した。また、海洋波のデータはNOAAのWAVEWATCH IIIの解析データを用いた。

本研究では、南シナ海を通過した台風で励起された脈動の震源分布を推定したPark & Hong (2020)と同様にRayleigh波を利用して震源推定を行った。この方法では、Rayleigh波の変位波形の水平成分が上下動成分に対して位相が $\pi/2$ シフトしている性質を利用している。ある方位に回転させた水平成分と、位相を $\pi/2$ シフトさせた上下動成分との相互相関係数が最も大きいとき、その方位に震源があると考えることができる。本研究では、北緯10度～60度、東経100度～160度の範囲において0.5度間隔で仮想的な震源を地表に設定し、各仮想震源に対して相互相関係数の観測点平均を計算することでprimary microseismsの震源を推定した。

その結果、南西諸島周辺と関東地方沿岸がprimary microseismsの励起源として代表的な場所であることが分かった。通常、primary microseismsは沿岸域における海洋波と海底地形のカップリングにより発生するため、台風の移動に伴いprimary microseismsの震源も移動すると考えられる。しかし、南西諸島周辺と関東地方沿岸においては台風の通過後も励起源となっていることが複数の台風において観測された。この結果は、南西諸島周辺と関東地方沿岸が日本列島の中でも特にprimary microseismsの励起に適した地域であることを示している。

震源の停滞の原因を考察するために、南西諸島周辺と関東地方沿岸における震源の停滞と有義波高の時間変化を比較した。その結果、震源の停滞と有義波高の上昇には時間的な相関があることが分かった。南西諸島周辺と関東地方沿岸の海底地形は比較的浅く複雑な地形であることから、周囲よりも相対的に強くprimary microseismsを励起したと考えられる。また、ジャックナイフ法を用いて震源推定結果の誤差についても議論を行った。

# Introduction of NASA's Titan Exploration Mission: Dragonfly –For the first seismic investigation on an icy moon–

\*Keisuke Onodera<sup>1</sup>, Hiroaki Shiraishi<sup>2</sup>, Satoshi Tanaka<sup>2</sup>, Taichi Kawamura<sup>3</sup>, Takefumi Mitani<sup>2</sup>, Hideki Murakami<sup>4</sup>, Ryuhei Yamada<sup>5</sup>, Shunichi Kamata<sup>6</sup>, Jun Kimura<sup>7</sup>, Hiroyuki Kurokawa<sup>8</sup>, Kiwamu Nishida<sup>1</sup>, Yasuhito Sekine<sup>8</sup>, Takeshi Tsuji<sup>9</sup>, Ralph Lorenz<sup>10</sup>

1. ERI/The University of Tokyo, 2. ISAS/JAXA, 3. IGP, 4. Kochi University, 5. The University of Aizu, 6. Hokkaido University, 7. Osaka University, 8. Tokyo Institute of Technology, 9. School of Engineering/The University of Tokyo, 10. Johns Hopkins University

## 1. 概要

DragonflyはNASAのニューフロンティア計画の一つとして2019年に採択された土星衛星タイタン探査ミッションである。過去40年にわたる惑星探査(Voyager, Cassini-Huygens)および地上観測により、タイタンでは、液体が表面に安定的に存在し、大気は生命前駆物質の生成に必要な窒素やメタンなどで構成されていることが確認されている<sup>[1]</sup>。こうした環境は、原始地球大気に似通っており、タイタンを探査することで「地球でどのように生命が誕生したのか?」「地球以外の天体に生命は存在する(した)のか?」といった疑問への解答の手がかりを得ることができる<sup>[2][3][4]</sup>。Dragonflyは2027年に打ち上げ、2034年頃にタイタンに到着し、そこから約3年間の科学観測を行うといった約10年にわたる大規模な計画である<sup>[5]</sup>。この計画の特徴として、大型のドローンを用いた離着陸可能な探査が挙げられる(図1)。Dragonflyは、その名の通りトンボのように、タイタン上を転々としながら、各地点で化学分析・気象観測および地球物理観測を実施することで、生命前駆物質の有無、あるとすればその存在量、またそれらの物質の生成に至らしめた環境を明らかにすることを目的としている。上記の観測項目のうち、我々は地球物理観測の中の地震観測を担当する。

## 2. タイタン地震計: DraGMet SEIS

我々のチームでは、長年JAXA宇宙科学研究所にて開発が進められてきた惑星探査用地震計をDragonflyに提供ならびに氷天体初の地震観測の実現を目指し、観測機器の開発・性能評価・科学的検討を進めている。現在は、2027年の打ち上げに向け、Engineering Model (宇宙機搭載用の前段階)の製作に取り組んでいる。搭載予定の地震計パッケージDraGMet SEIS (Dragonfly Geophysical and Meteorological Package: Seismometer)は、地震計・プリアンプ・風除けカバーからなり、1.5気圧・マイナス180度という過酷な環境において、 $3 \times 10^{-9}$  m/s@0.1-10Hz程度の振動まで測定することを目指している。タイタンにおける地震観測は、自然地震と人工地震の両方を想定しており、これらの観測を通じてタイタンの地震活動度と地下構造の把握を主目的としている。自然地震については、未だ不確定な部分も多く検討の余地があるが、地球・月・火星での地震観測経験から「土星-タイタン間の潮汐作用による断層活動」「氷地殻テクトニクス」「地溝からの間欠泉現象」「氷火山の噴火・溶岩流の噴出」「小天体衝突」「内部海の対流」「固気カップリング」などに起因する地震が考えられている<sup>[6]</sup>。人工地震については、サンプル採集掘削用ドリルの稼働に伴う振動を利用し、表層付近の構造を精密に測定することを検討している。

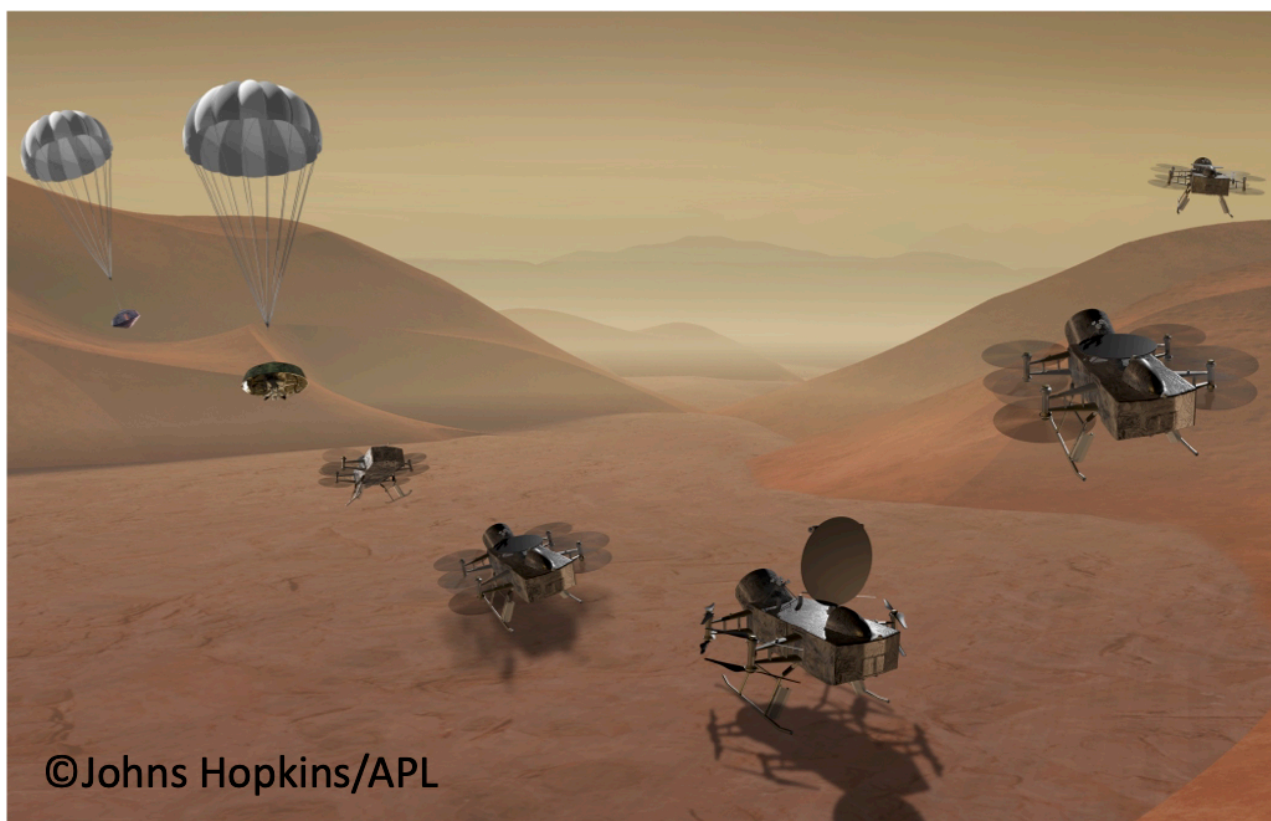
## 3. 日本の地震学コミュニティの参画誘致

Dragonflyは、氷天体での初の離着陸探査であり、宇宙における生命の存在可能性を調査するといった科学的にも大きな意義を持つ。しかし、土星衛星ということもあり、打ち上げから観測終了まで10年ほどの時間を要するため、場合によっては運用中にメンバーがリタイアするケースも考えられる。こうした長期間に渡る計画では世代間での探査の引き継ぎが必須となるが、国内における惑星地震学コミュニティは未だ数名程度の規模であるのが現状である。世界的にはNASAの火星地震探査計画InSightが成功を収めたことで、地球の地震学者の惑星地震学コミュニティへの参加が進みつつあり、将来の惑星探査においても地震学者の積極的な参加が期待されている。

本発表は、日本の地震学コミュニティの惑星地震探査への参画誘致を目的に、我々の日々の活動と共に、惑星地

震学の魅力, 地球惑星科学における重要性について紹介する.

**参考文献** [1] Nimmo and Pappalardo (2016), *JGRE*, 121, 1378. [2] Chyba and Hand (2005), *ARA&A*, 43, 31. [3] Lazcano and Hand (2012), *Nature*, 488, 160. [4] Mckay (2016), *Life*, 6, 8. [5] Barnes et al. (2021), *PSJ*, 2, 130. [6] Vance et al. (2018), *JGR Planet*, 123, 180–205.



©Johns Hopkins/APL

図1. ドローンを用いた離着陸探査の概念図.

**Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method**

📅 Tue. Oct 25, 2022 9:45 AM - 11:00 AM JST | Tue. Oct 25, 2022 12:45 AM - 2:00 AM UTC | 🏢 ROOM C  
8th floor (Training Room 820)

**[S01] AM-1**

chairperson: Kiyoshi YOMOGIDA (Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University), Atsushi Nozu (Port and Airport Research Institute)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S01-01] Required conditions for the formulation of seismic interferometry under simultaneous incidence of P, S and Rayleigh waves

\*Atsushi NOZU<sup>1</sup>, Yosuke Nagasaka<sup>1</sup> (1. Port and Airport Research Institute)

---

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S01-02] Seismic velocity response to ground water level revealed by ACROSS and seismic array

\*Hiromu Ohba<sup>1</sup>, Ryoya Ikuta<sup>1</sup>, Koshun Yamaoka<sup>2</sup>, Shuhei Tsuji<sup>3</sup>, Feng Chen<sup>2</sup>, Toshiki Watanabe<sup>2</sup>, Haruno Koike<sup>2</sup> (1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Japan Agency for Marine Earth Science and Technology)

---

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S01-03] Active seismic monitoring tests on a field slope during rainfall

\*Masayuki NAKAYAMA<sup>1</sup>, Hironori KAWAKATA<sup>1</sup>, Issei DOI<sup>2</sup> (1. Ritsumeikan Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ.)

---

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S01-04] Semblance analysis of seismic array records using wasserstein metric

\*Tatsuki Nara<sup>1</sup>, Hiroyuki Goto<sup>2</sup> (1. Kyoto University Graduate School, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

---

10:45 AM - 11:00 AM JST | 1:45 AM - 2:00 AM UTC

[S01-05] Parameter optimization of non-linear modellings with a surrogate function: Application to waveform inversions

\*Kiyoshi YOMOGIDA<sup>1</sup> (1. Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University)

# Required conditions for the formulation of seismic interferometry under simultaneous incidence of P, S and Rayleigh waves

\*Atsushi NOZU<sup>1</sup>, Yosuke Nagasaka<sup>1</sup>

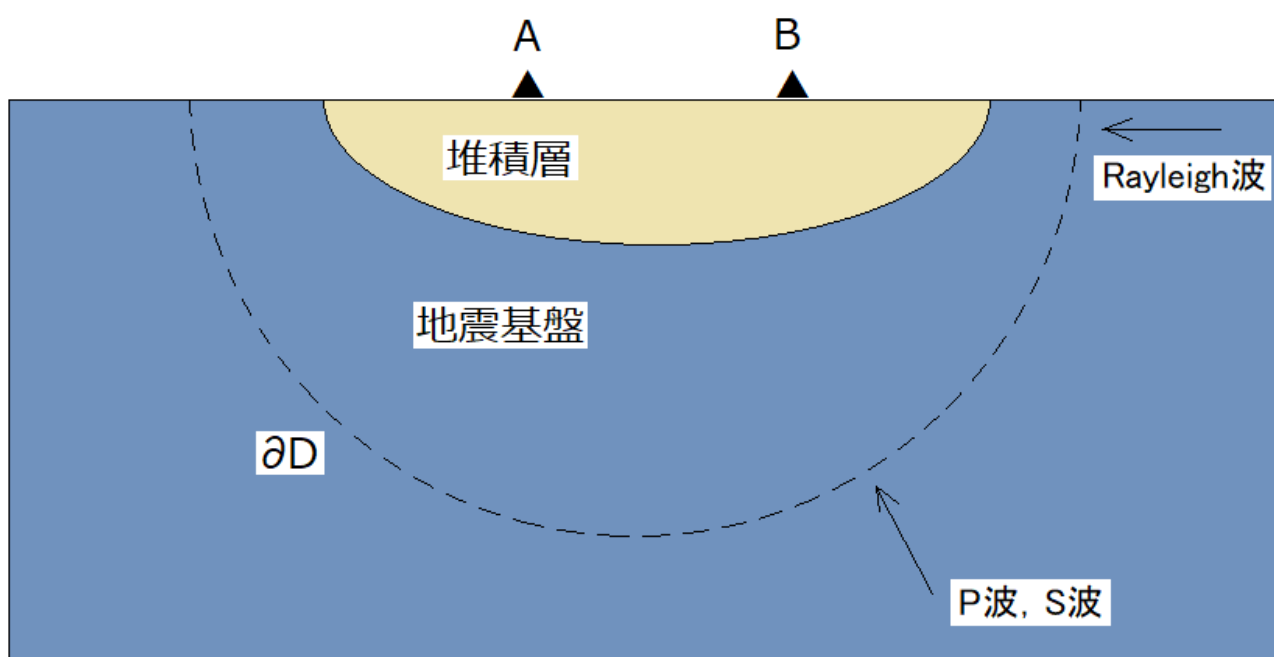
## 1. Port and Airport Research Institute

著者らは、常時微動 H/V スペクトルを実務上多用する者として、常時微動 H/V スペクトルに関する正しい認識を得たいと願っている。常時微動 H/V スペクトルの波動論的な解釈のうち最も興味深いものは Sanchez-Sesma et al. (2011)によるものであり、そこでは、常時微動 H/V スペクトルは載荷点と観測点が等しい場合のグリーン関数の比の平方根であると解釈されている。この解釈は、Wapenaar and Fokkema (2006)による地震波干渉法の定式化から直ちに導かれるので、Wapenaar and Fokkema (2006)による地震波干渉法の定式化が正しい限り、Sanchez-Sesma et al. (2011)による常時微動 H/V スペクトルの解釈も正しいということになる。そこで、Wapenaar and Fokkema (2006)による地震波干渉法の定式化を逐一追ってみると、遠方からP波、S波が入射する場合の定式化となっており、自由表面の存在を考慮する場合でも、Rayleigh波入射は考慮されていないことに気付く。Wapenaar and Fokkema (2006)による定式化では、遠方では媒質は均質であると仮定しているが、この均質媒質は地震基盤であると考え、と、Sanchez-Sesma et al. (2011)の解釈を適用する上で都合が良い（図）。そのためには、この均質媒質は全無限でなく半無限であることが望ましく、それに伴い、Wapenaar and Fokkema (2006)による定式化を拡張して、Rayleigh波入射も考慮できるようにすることが望ましい。

そこで、本研究では、遠方での媒質は半無限であると考え、Wapenaar and Fokkema (2006)による定式化を拡張し、P波、S波、Rayleigh波の同時入射の下での地震波干渉法の定式化を行った。Wapenaar and Fokkema (2006)による定式化が成立するための条件として、外部から入射するP波とS波の単位体積あたりのエネルギーの比は、 $E_s/E_p = 2(\alpha/\beta)^3$ でなければならないことは広く知られている。同様に、Rayleigh波の入射も考慮する場合は、Rayleigh波の単位面積あたりのエネルギーを $E_R$ とすれば、 $E_R/E_p = (\pi/\omega) \alpha^3/C_R^2$ でなければならないことが本研究の結果として示された。ここに $\omega$ は角周波数、 $C_R$ は半無限媒質におけるRayleigh波速度である。この比は、Weaver(1982; 1985)が拡散波動場におけるRayleigh波とP波のエネルギー比として示した値と同じである。

ただし、Weaverの論文は、ある周波数の近傍にある複数の振動モードのエネルギーがすべて同じになった状態を拡散波動場と定義した上で、その場合のRayleigh波とP波のエネルギー比に言及したものであり、現実の媒質においてそのようなエネルギー比が実現されることをどの程度期待して良いかは、Weaverの論文を読んだだけではわからない。P波とS波のエネルギー比については、これまで、媒質内部における散乱の観点(Ryzhik et al., 1996)や媒質表面における反射の観点(Egle, 1981; Nagasaka and Nozu, 2022)から検討がなされ、上述のエネルギー比が実現することの確からしさについて研究が進められているが、Rayleigh波とP波のエネルギー比については研究が不足していると言える。そこで、本研究では、その端緒として、P波とS波のエネルギー比に関連したAki(1992)の研究を拡張し、Rayleigh波とP波のエネルギー比について検討した。

Aki(1992)の研究は、全無限媒質中に局在する任意形状の散乱体を考え、この散乱体によるP波からS波への変換率とS波からP波への変換率の比が、P波速度とS波速度の比によって簡単に表されることを示したものである。その結果から、このような散乱体によって弾性波が繰り返し散乱されるうちに、S波とP波のエネルギー比は上述の割合に収束していくことが期待される。本研究では、半無限媒質の表面付近に局在する任意形状の散乱体を考え、この散乱体によるP波からRayleigh波への変換率とRayleigh波からP波への変換率の比について検討した。その結果によると、このような散乱体によって弾性波が繰り返し散乱されるうちに、Rayleigh波とP波のエネルギー比は上述の割合に収束していくことが期待される。



## Seismic velocity response to ground water level revealed by ACROSS and seismic array

\*Hiromu Ohba<sup>1</sup>, Ryoya Ikuta<sup>1</sup>, Koshun Yamaoka<sup>2</sup>, Shuhei Tsuji<sup>3</sup>, Feng Chen<sup>2</sup>, Toshiki Watanabe<sup>2</sup>, Haruno Koike<sup>2</sup>

1. Shizuoka University, 2. Nagoya University, 3. Japan Agency for Marine Earth Science and Technology

本研究では、ACROSS（Accurately Controlled Routinely Operated Signal System）と地震計アレイを用いて、降雨に伴う地震波速度の時間変化を観測した。

ACROSSは、精密に制御された地震波を長時間継続して送信することにより地下構造の時間変化を捉えることを目的とした震源システムである。本研究では静岡県森町に設置したACROSS震源装置に対して約3km離れた地点に設置した地震計を用い、降雨に対する地震波速度の応答を調査した。2017年と2018年にそれぞれ2台の地震計を用いた3週間ずつの予備調査を行い、2020年9月から2021年9月、同じ場所に小規模地震計アレイを展開して観測を行った。

地震波速度は地下水位に伴って変化する。近年、地震波干渉法を用いた地震波速度のモニタリング（例えば、Kim & Lekic, 2019、Clements & Denolle, 2018など）がこれを明らかにしてきたが、地震波干渉法では環境震動中に優占する地震波が強調されるため、特定の実体波や表面波の波群毎に地下水に対する応答を調べることは難しい。波源としてACROSSを導入し、地下水位の変動に対する様々な波群の応答を別々に解析することで、地下水が地震波速度を変化させるメカニズムの特定を試みる。また、観測された地震波速度の変動がどの範囲の地下水位の変動を反映するのかを知ることも重要な課題である（例えば、Liu et al. 2020）。ACROSSを用いることで、地下水位の時間発展の局所・広域の違いに対応した地震波速度の変動を高い時間分解能で解析できる。

2017年と2018年の観測では、パーティクルモーションから到達している波の種類を特定し、2.8秒付近に到達し（速度に直すと1.1 km/s）水平成分が卓越する波をラブ波的、3.8秒付近に到達し（0.79 km/s）鉛直面内でレトログレードを示す波をレイリー波的と考えた。これらの地震波の走時変化は、降雨量からタンクモデルで予測される地下水位変化との間に高い相関がみられた。この際、地震波走時変化を最もよく説明するのは、降雨に対して時定数20日の指数関数的減衰応答であった。2つの波群は地下水位に対する感度が異なり、2.8秒の波群では0.035ミリ秒/m (=1.25%/m)、3.8秒の波群では0.024ミリ秒/m (=0.86%/m)である。2020年9月から開始したアレイ観測では、半径4、8、16mの同心円上に3つの三角形を配したSPAC法の典型的なアレイ構成に、震源方向の波数分解能を高めるために南側と北側に各2点を追加して14点の地震計を設置した。ACROSS信号のアレイ解析の結果、予備観測で降雨に対する応答が大きかった2.8秒と3.8秒付近の地震波の見かけ速度は直達S波と同じ（～2.5 km/秒）であり、表面波ではないことが分かった。

走時変化の原因範囲について調査するため上記2つの波群の地震計アレイ内での速度の変化を算出したところ、降雨に対応した変動は認められなかった。アレイに到達している地震波の走時変化は、アレイ直下ではなく、ACROSS震源から地震計アレイまでの経路の途中の地下水位変化に応答しているものと推定される。

以上から、降雨に対する地震波走時変化の20日の時定数は、広域の水の流動を表している可能性がある。2022年8月から開始したアレイ直下の地下水位の実観測を開始した。これと河川流量、近傍のHi-net観測点の地震波走時変動の解析結果とあわせて、地下水が地震波速度を変化させるメカニズムを考察したい。

### 参考文献

Clements. T., Denolle. A. M., (2018), Tracking Groundwater Levels Using the Ambient Seismic Field,

*Geophysical Research Letters*, **45**(13), 6459-6465.

Kim. D., Lekic. V., (2019), Groundwater Variations from Autocorrelation and Receiver Functions, *Advancing Earth and Space Science*, **46**(23), 13722-13729.

Liu. C., Khurram. A., Eric. D., (2020), Seismic Velocity Changes Caused by Water Table Fluctuation in the New Madrid Seismic Zone and Mississippi Embayment, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, **125**(8).

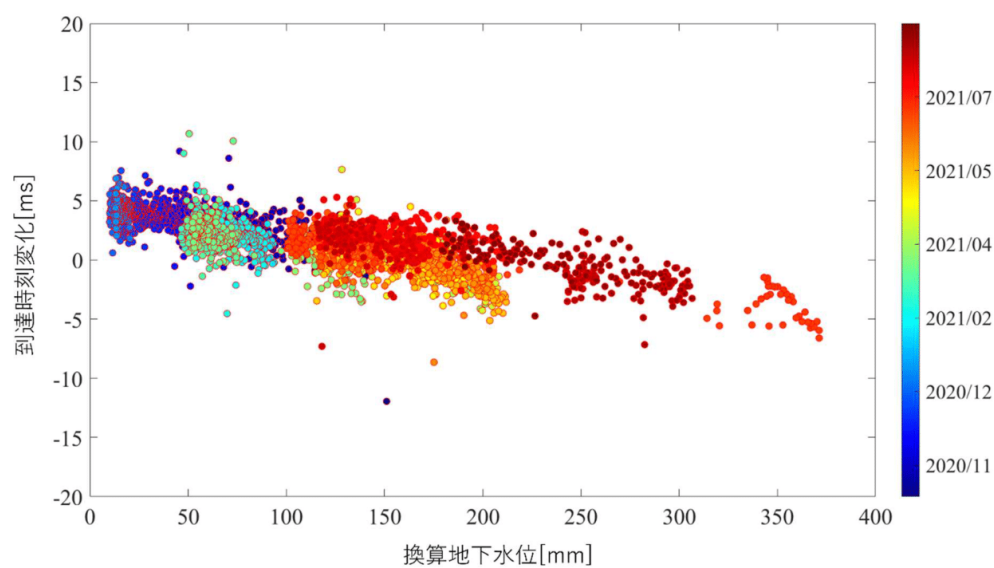


図. 2020 年以降における 2.8 秒の波群の到達時刻変化と換算地下水位の関係

到達時刻変化は正が早まりで負が遅れを示している。地下水位が 100mm 増加すると地震波は 2.3 ミリ秒遅れて到達する。

## Active seismic monitoring tests on a field slope during rainfall

\*Masayuki NAKAYAMA<sup>1</sup>, Hironori KAWAKATA<sup>1</sup>, Issei DOI<sup>2</sup>

1. Ritsumeikan Univ., 2. DPRI, Kyoto Univ.

降雨や融雪による斜面の表層崩壊の機構解明などを目的として、弾性波を利用して地下水の挙動をモニタリングしようとする研究が行われている。例えば、Mainsant et al. (2012) は、過去に崩壊を経験した斜面での表面波の受動的観測をおこない、地震波干渉法を用いて、降雨にともなう斜面崩壊時の弾性波速度変化を調べた。弾性波速度は、主要な崩壊が発生する数日前から次第に低下していき、崩壊直前にはさらなる急激な低下を示した。しかしながら、地震波干渉法は励起源の分布が等方的でないことや季節によって変動することなどが指摘 (e.g., Stehly et al., 2006) されており、地下水の時空間変化を適切に把握するためには、震源が空間的だけでなく時間的にも安定していることが望ましい。地震学では、例えば弾性波アクロス (e.g., Ikuta et al., 2002) のような時空間的に安定した人工震源を用いた能動的弾性波モニタリングが試みられている。しかしながら、人工震源を用いたモニタリングは長期間同じ場所に設置され、地殻などの主に固結した岩盤を対象に長期モニタリングがおこなわれている。崩壊が予想される斜面や地震後に崩壊した斜面などにおいて短期的あるいは臨時的な観測をおこなうためには、機動的な観測システムが望まれるものの、人工震源を含む機動的な観測システムはほとんど例がなく、斜面表層での観測事例はほぼみられない。さらに、多孔質岩石試料において、試料内の含水量に応じて透過弾性波の伝播特性変化に周波数依存性が生じることが示唆されている (e.g., Müller et al., 2010)。もし斜面内部においても透過波の伝播特性に周波数依存性を生じさせるような現象がみられるならば、人工震源からの透過波のスペクトルを安定的にモニタリングすることによって、観測結果の周波数依存性も考慮した解釈が可能になる。そこで、本研究では斜面にて、降雨時を含む期間において人工震源を用いた能動的弾性波モニタリングをおこない透過波のスペクトルの安定性を調べた。

実斜面に1台の市販の振動スピーカー (以下加振器と呼ぶ) と、約2 m離れた位置に1台の加速度計AC9 (富士セラミックス社製S04SG2)、約8 m離れた位置に8台の同種の加速度計AC1-8を設置し多点アレイ観測をおこなった。入力信号として30秒間に10 Hzから310 Hzまで線形に変化するスイープ信号を採用し、ファンクション・ジェネレータ (以下、FG) を用いて加振器にくり返し印加した。なお印加する電圧は人工震源から放射される波が地盤に影響を及ぼさないように微弱なものとした。降雨時を含む2017年3月19日0時から2017年3月22日5時のおよそ3日間、サンプリング周波数51.2 kspsで透過弾性波を連続収録した。当該期間の降水記録は、気象庁の福岡観測点における降水量データを使用した。

収録波形はジッタにより信号の初期位相が周期的に変化しておりそのままではスタックできなかったため、加速度計AC9で得られた位相変化が震源スペクトルの位相変化に等しいと仮定し、全ての加速度計ACに対して位相補正後スタックした。以降の解析では、AC9において強度が高かった90~300 Hzの帯域の結果のみ議論する。スタック後の各ACのスペクトログラムをAC9でデコンボリューションし、S/N比が2以上となる場合のデータのみを使用して位相成分の時間変化を調べた。

スタック後のスペクトログラムについて、計測初期の値に対する位相差の時間変化の結果から、震源に一番近いAC8において比較的安定した結果が得られた (図1)。このときの速度は430~970 m/sの範囲に求めた。今後は、降雨後の速度の推定および得られた速度について精査する。

謝辞: 本研究は、JSPS科研費JP15H02996と26750315の助成を受けた。また、気象庁の降水量データを利用した。ここに感謝の意を表する。

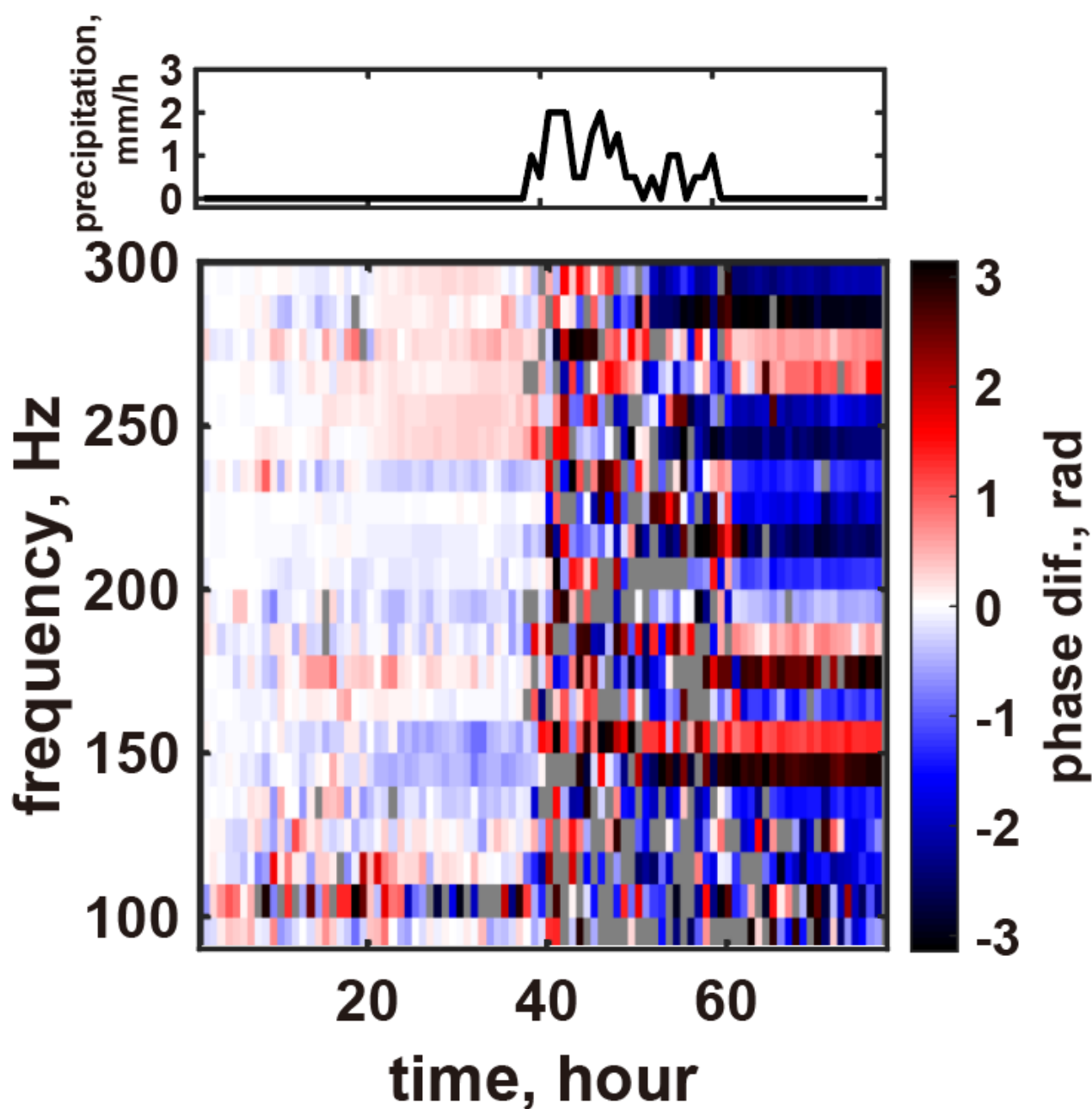


図1. 降水量と AC8 に関する計測初期の値に対する位相差の時間変化.  
下図の灰色は S/N 比が 2 未満であったことを表す.

## Semblance analysis of seismic array records using wasserstein metric

\*Tatsuki Nara<sup>1</sup>, Hiroyuki Goto<sup>2</sup>

1. Kyoto University Graduate School, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

地震波形の類似度評価は地震学および地震工学における重要な要素の一つである。例えば、センブランス解析、震源インバージョンなどでは、地震波形の類似度評価が必要となる。現在、地震波形の類似度評価の指標として波形やその包絡線の平均二乗誤差を使用することが一般的であるが、近年になって最適輸送理論の一つであるワッサーズタイン計量 $W_2^2$ を適用することが提唱されている。そこで、本研究では $W_2^2$ を用いてセンブランス解析を行い、従来手法との比較を行った。

センブランス解析とは、地震計アレイにおける観測波形の走時差と地震計間距離から波群の伝播速度と到来方向を推定する解析手法をいう。解析過程において、波形の類似度を評価する必要があるが、その指標として平均二乗誤差と等価なセンブランス係数 $S_e$ を用いるのが一般的となっている。ここで、 $W_2^2$ と $S_e$ の性質の違いを考察するため、同一波形の時間ずれ(図1)に対する $W_2^2$ ,  $S_e$ の挙動をそれぞれ示す(図2, 図3)。ともに類似度の最大点は時間ずれ0[s]となっているが、 $S_e$ は時間ずれに対して細かく振動し、局所解が複数出現している。一方、 $W_2^2$ は時間ずれに対して凸性を示し、類似度の最大点を大域的に判断できることが分かる。

本研究では、2018年6月18日7時58分に発生した大阪府北部の地震を対象とし、大阪市福島区にある地震計アレイで観測された速度波形のUD成分を用いて、実体波に対するセンブランス解析を行った。解析結果の見方を図4に示し、解析結果を図5に示す。P波・S波の到達時には $W_2^2$ ,  $S_e$ ともに北東方向に解が出現しており。地震計アレイから見て震源である高槻市が北東方向であることを踏まえると、整合性の取れた結果といえる。また、 $W_2^2$ の方が局所解が少ない傾向にあり、解析解の特徴を大域的に捉えられるということが分かる。

### <参考文献>

- ・ Bjorn Engquist and Brittany D Froese. Application of the wasserstein metric to seismic signals. arXiv preprint arXiv:1311.4581, 2013.
- ・ Bjorn Engquist and Yunan Yang. Optimal transport based seismic inversion: Beyond cycle skipping. arXiv preprint arXiv:2002.00031, 2020.
- ・ 水上昌信, 鍬田泰子, 後藤浩之, 福島康宏. 大阪平野における高密度地震観測システムの構築. 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 2018.

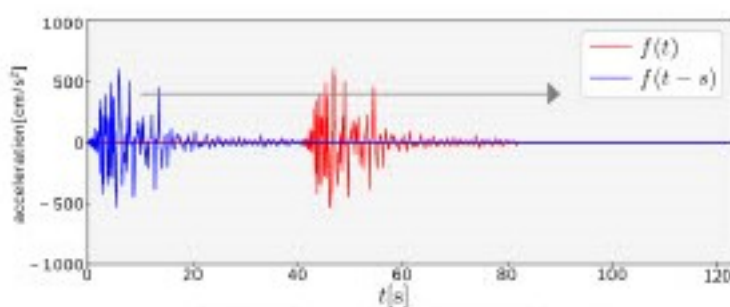


図 1. 同一の地震波形の時間シフト

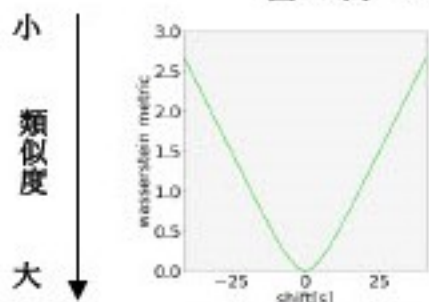
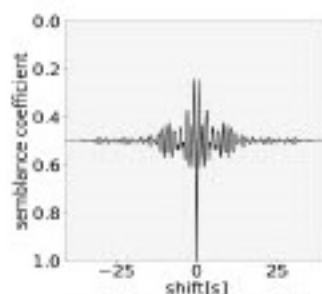
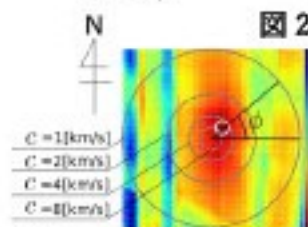
図 2. 二波形間の  $W_2^2$ 図 3. 二波形間の  $S_e$ 

図 4. 解析結果の見方

赤色に近いほど波形の類似度が大きく、青色に近いほど波形の類似度が小さい。白丸は波形の類似度の最も大きい点を示しており、そのときの  $c, \phi$  がそれぞれ実際の伝播速度と到来方向を示していると推定できる。

ワッサーズタイン  
計量  $W_2^2$

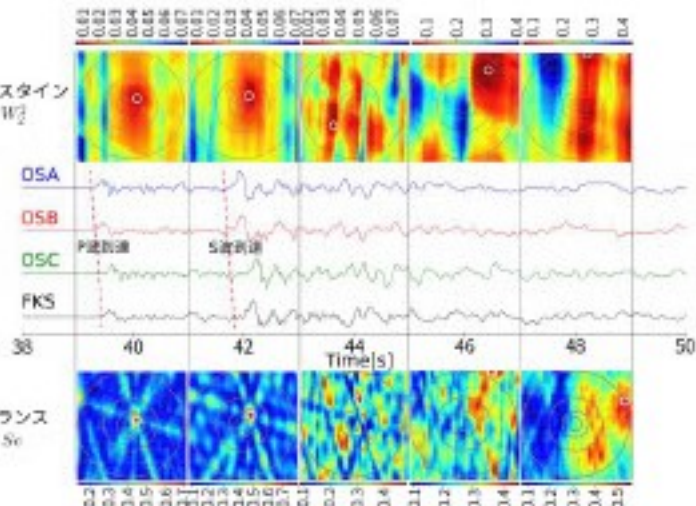


図 5. 実体波に対するセンブランス解析の結果

# Parameter optimization of non-linear modellings with a surrogate function: Application to waveform inversions

\*Kiyoshi YOMOGIDA<sup>1</sup>

1. Earth and Planetary Dynamics, Grad Sch Science, Hokkaido University

波形インバージョンなど地震学に用いられているモデルパラメータの推定において、最近では非線形性が高く複雑な問題を対象とする場合が多い。ローカルな極小値への収束や遅い収束速度を避けるための初期値の選択など、他分野でも様々な手法の提案がなされてきた（e.g., Wienerフィルタを介した波形や相互相関の最適化）。音源などの複雑な信号処理では、最適化への尤度関数から直接モデルパラメータを推定するのではなく、単純な代理関数（surrogate function）を導入し、これを反復操作で最適化する過程で安定したパラメータ推定が可能となる方法が利用されている。さらに、従来の推定法は単一の事象の場合には有効だが、複数の事象が混在しているデータ（例：複数のガウス分布が重なると混合ガウス分布となる（Fig. 1））では、これを直接の最適化の関数とすると、非効率で不安定な解法となってしまう。そのような場合、EMアルゴリズムと呼ばれる手法より、単純な反復操作の繰り返しで安定して各現象のパラメータが推定できる。地震学で類似の問題としては、複数の震源からの波形データや後続の散乱波が大きく複雑な場合などに当たる。本研究では、これらの他分野で発展中の手法を検討し、波形インバージョンなど地震学への応用を考察する。

複数の現象が混在したデータに対しては、各現象の確率密度関数pdfは重み $\alpha$ 付きガウス分布（平均 $\mu$ と標準偏差 $\sigma$ ）の簡単な和である、式(1)やFig.1で表される（ $\theta$ は $\mu$ などの推定すべきパラメータ群とする）。これが最大となるような $\theta$ を求めるには、直接の計算は困難なので、従来は選んだ初期値からのTaylor展開での線形化により反復操作で求めた。これに対して、EMアルゴリズムではJensenの不等式（ $f$ は一般の凸関数、式(2)）より、潜在変数 $z$ を介して、式(3)の右辺で尤度関数を代用する。ここで、 $\lambda$ を反復操作における $k$ 番目ステップのパラメータ推定値 $\theta^{(k)}$ とした元の変数 $x$ の条件付きpdfとおくと、式(4)となる。さらに、 $\theta = \theta^{(k)}$ の場合に等号となるので、右辺 $g(\theta)$ が最大となる $\theta$ を求め、それを $\theta^{(k+1)}$ として更新すれば良い。このような反復操作によって、最適な推定値が安定して得られる（Fig. 2）。式(4)は元のpdfである式(1)に比べて、容易に最適化が求められる形式を選ぶことができる点が重要である。式(4)の被積分関数内のlog関数の分子のみ $\theta$ が含まれるので、実際にはこの部分を代理関数 $Q$ として、これを各ステップで最大となる $\theta$ を探索する。

混合ガウス分布の場合、各データが独立に生成されたと仮定できれば、 $j$ 番目のガウス分布が生成される事前確率を $\alpha_j$ とすると、式(4)のうち、最適化すべき代理関数は式(5)となる。これを $\alpha, \mu, \sigma$ での偏微分がゼロとして、 $k$ 番目のステップの各パラメータが解析的に求まるので、十分に収束するまで単純に反復操作すれば良い。

代理関数を規定するJensenの不等式は、逆関数についての式(6)や対数関数に対する式(7)など様々な例がある。これらを活用すると、ガウス分布のみならず、一般のpdfの形式に適用できる。例えば、L1ノルム最小に対応する、平均の両側が指数関数的に減少するラプラス分布でも、式(5)と同様な定式化が可能となる。よって、波形インバージョンだけでなく、エンベロップや多次元のスペクトルグラム、f-kダイアグラム等、地震学で広い応用が可能である。

$$p(x, \theta) = \sum_{j=1}^M \alpha_j \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left(-\frac{(x - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \quad (1)$$

$$f\left(\sum_i \lambda_i \theta_i\right) \leq \sum_i \lambda_i f(\theta_i) \quad (2)$$

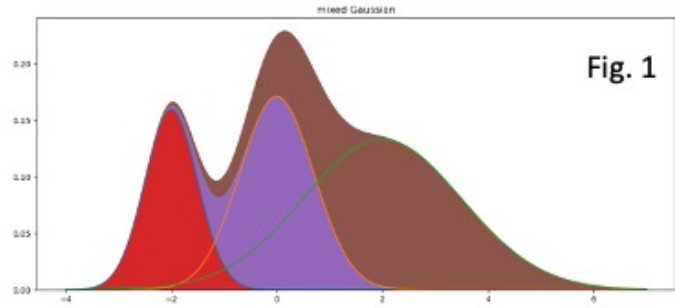


Fig. 1

$$\log p(x, \theta) = \log \int_z p(x, z, \theta) dz \geq \int_z \lambda(z) \log \frac{p(x, z, \theta)}{\lambda(z)} dz \quad \text{where} \quad \int_z \lambda(z) dz = 1 \quad (3)$$

$$= \int_z p(z|x, \theta^{(k)}) \log \frac{p(x, z, \theta)}{p(z|x, \theta^{(k)})} dz \equiv g(x, \theta, \theta^{(k)}) \quad (4)$$

$$Q(\theta, \theta^{(k)}) =$$

$$\sum_i \sum_j p(z_i \equiv j | x_i, \theta^{(k)}) \log \left( \frac{\alpha_j}{\sqrt{2\pi}\sigma_j} \exp\left(-\frac{(x - \mu_j)^2}{2\sigma_j^2}\right) \right) \quad (5)$$

$$\frac{1}{\sum_i \lambda_i x_i} \leq \sum_i \lambda_i \frac{1}{x_i} \quad (6)$$

$$\log x \leq \frac{x}{x_0} + \log x_0 - 1 \quad (7)$$

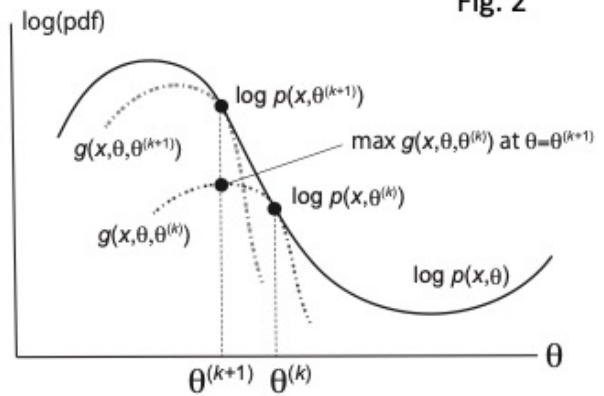


Fig. 2

## Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method

📅 Tue. Oct 25, 2022 11:15 AM - 12:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 2:15 AM - 3:30 AM UTC | 🏢 ROOM C  
8th floor (Training Room 820)

**[S01] AM-2**

chairperson: Hisashi NAKAHARA (Graduate School of Science, Tohoku University), Daisuke Sato (DPRI, Kyoto University)

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S01-06] Computational difficulty of posterior means and ABIC in fully Bayesian inference: a proposal of new Monte-Carlo methods

\*Daisuke Sato<sup>1</sup>, Yukitoshi Fukahata<sup>1</sup> (1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

---

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S01-07] Accuracy evaluation of the approximation of spatiotemporal boundary integral equation toward implementation of FDP-H matrices

\*Takumi Miyajima<sup>1</sup>, Ryosuke Ando<sup>1</sup> (1. The University of Tokyo)

---

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S01-08] Formularization of spatial autocorrelation for DAS and 3C seismometer and application to seafloor cable data off Sanriku

\*Shun FUKUSHIMA<sup>1,2</sup>, Masanao SHINOHARA<sup>2</sup>, Tomoaki YAMADA<sup>2</sup>, Kiwamu NISHIDA<sup>2</sup>, Akiko TAKEO<sup>2</sup>, Kiyoshi YOMOGIDA<sup>3</sup> (1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences)

---

12:00 PM - 12:15 PM JST | 3:00 AM - 3:15 AM UTC

[S01-09] Formulation of the mixed cross-correlations between displacement and DAS axial strain

\*Hisashi NAKAHARA<sup>1,2</sup>, Matthew M. Haney<sup>2</sup> (1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Alaska Volcano Observatory, USGS)

---

12:15 PM - 12:30 PM JST | 3:15 AM - 3:30 AM UTC

[S01-10] Amplitude dependence of seismic wave attenuation

\*Hayato Tero<sup>1</sup>, Junichi Nakajima<sup>1</sup> (1. Tokyo Institute of Technology)

# Computational difficulty of posterior means and ABIC in fully Bayesian inference: a proposal of new Monte-Carlo methods

\*Daisuke Sato<sup>1</sup>, Yukitoshi Fukahata<sup>1</sup>

1. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

ベイズ推定では、観測データとモデルパラメータを理論的に関係付ける観測方程式とモデルパラメータに関する事前情報から、モデルパラメータの事後分布を構成する。フルベイズ推定では、観測方程式と事前分布によるモデルパラメータの拘束を重み付ける超パラメータについても事前分布（超事前分布）を考慮し、モデルパラメータと超パラメータに関する同時事後分布を構成する。同時事後分布はモデルパラメータと超パラメータの全統計的情報を記述するフルベイズ推定の形式解だが、ここからモデルパラメータの有用な情報を引き出す縮約の操作は必ずしも容易ではない。Sato, Fukahata, & Nozue (2022)は、同時事後分布から単純に計算した場合、モデルパラメータの標本平均が事後母平均へ収束するのにモデルパラメータ数の指数関数時間が必要になることを結論づけた。赤池のベイズ情報量規準(ABIC; Akaike, 1980)として知られる同時事後分布をモデルパラメータについて積分(周辺化)する方法が有効な縮約であることが同時に示されたが、非線形問題では通常ABICを解析的に計算できないという問題は残る。同時事後分布のモデルパラメータに関する周辺化を数値的に実行することも、モデルパラメータ数の指数関数時間を要するために実行は一般に現実的でない。

本研究では、非線形問題でABICおよび事後母平均を高速に計算するための新たなモンテカルロ法を提案し、その性能を検討する。新手法では、(i)モデルパラメータの条件付事後分布と(ii)超パラメータの周辺事後分布へと同時事後分布を形式的に分解する。超パラメータの周辺事後分布の解析形(閉形式)が既知である場合、(ii)は従来のABICの計算と同一であり、上記手法は入れ子構造をなしたMulti-Stage Monte-Carlo法として数値計算できる。さらに、超パラメータの周辺事後分布の閉形式が未知であるより一般の場合には、熱力学的積分法(Kirkwood, 1935)と呼ばれる、統計力学における自由エネルギーの高速計算法を応用する。熱力学的積分法は、未規格化確率(ボルツマン因子)の積分の対数(自由エネルギー)の超パラメータ微分が高速計算可能なボルツマン因子の対数(エネルギー; 損失関数)の平均になることを利用した、一種のlikelihood free推定である。超パラメータの周辺事後分布は、データ分布・モデルパラメータの事前分布・同条件付事後分布に対する3つの自由エネルギーの線型結合になっており、各項の超パラメータに関する微係数を熱力学的積分法で高速に、つまり非指数関数時間で計算できる。これにより、超パラメータ値の微小変化に対するABICの変化量(ベイズ因子)が得られ、前述のMulti-Stage Monte-Carlo法が非指数関数(多項式)時間解法として機能する。

発表では、上記手法を概略した上で、その性能を従来標準的に用いられてきたフルベイズモンテカルロ法の結果と比較する。これまでに、Sato, Fukahata, & Nozue (2022)と同様の線形逆問題で、モデルパラメータの事後平均の計算において新手法の方がより高速であることを確認している。さらに、新手法の応用として、同時事後分布が非ガウス分布になる、非負の拘束下 (ABICの閉形式が得られるためベンチマークとして利用できる)やスパース条件下での滑りインバージョンを取り上げる予定である。

# Accuracy evaluation of the approximation of spatiotemporal boundary integral equation toward implementation of FDP-H matrices

\*Takumi Miyajima<sup>1</sup>, Ryosuke Ando<sup>1</sup>

## 1. The University of Tokyo

### 1.はじめに

時空間領域に関する境界積分方程式法を解くためには、境界要素数 $N$ 、時間ステップ数を $M$ として、積分核と滑り速度の畳み込みを愚直に計算すると $O(N^2M^2)$ の計算量と $O(N^2M)$ のメモリを使用することになる。我々は、巨大地震の導き破壊シミュレーションを高効率に行うため、Sato and Ando(2021)で構築されたFDP=H行列法を3次元問題に拡張するとともに、大規模並列計算に対応した実装とするためのコード開発を行なっている。FDP=H行列法とは、既存のFDP法(高速領域分割法, Ando(2016))で積分核の性質ごとにドメインを分割し、走時近似(Averaged Reduced Time: ART)によって時空間畳み込み積分を近似的に実行してH行列法を取り入れ、一部には量子化などの近似を用いる工夫を行うことで、 $O(N\log N)$ の計算量を達成するものである。今回は、3次元モデルを用いてFDP=H行列法で考慮する近似計算のうち、H行列の近似以外の部分を実装したため、その精度評価を行なった。

### 2. 手法

FDP法によって、積分核の因果律円錐はP波、S波の前線のDomain Fp, Domain Fsと、P波の到着後S波の到着までのDomain I, S波が過ぎ去ったあとのDomain Sの3つに分割される。

Domain Fは時間幅が $O(1)$ であり、グリーン関数の性質から応力核を時間方向に積分すると空間依存性の強い項と弱い項に分離できると考えられる。Domain Iは時間幅が広いため、応力核を時間方向にリサンプリングする量子化を行い、計算量やメモリを削減する近似を行う。H行列への実装を見越して、滑り速度の累積和(滑り)の差と積分核の積の形から、滑り速度の累積和と積分核の差の積の形に式変形を行なった。

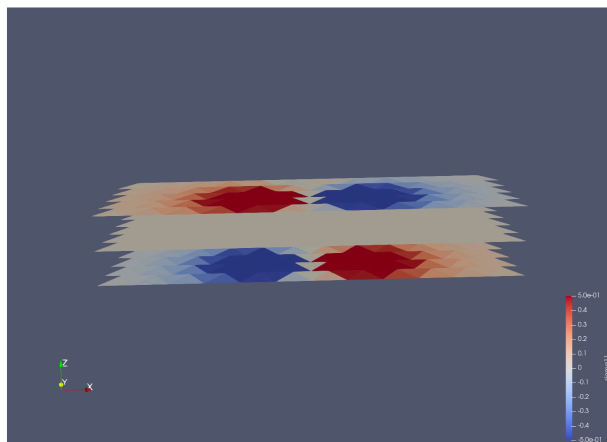
Domain Sは応力核が時間変化しない性質をもつ。本来は全ドメインに対して、空間依存の応力核行列の距離減衰の性質を用いたH行列近似を行うが、今回はH行列における分割を想定し、実空間の $x, y, z$ 各軸方向に数等分の分割を行い、各クラスターの重心を観測点の代表とみなして走時の近似を行うARTの実装のみ行なった。精度評価のための問題設定は次のようなものである。まず、断層形状モデルとして、3枚の断層面を平行に配置したものを仮定する。次に、1つの断層の中央付近を一定の時間滑らせ、周囲の断層面上での応力変化を計算する。さらに、応力の時空間変化について、厳密に計算した場合と金次計算した場合をそれぞれのドメインごとに比較して、近似精度を評価する。

### 3. 予備的結果

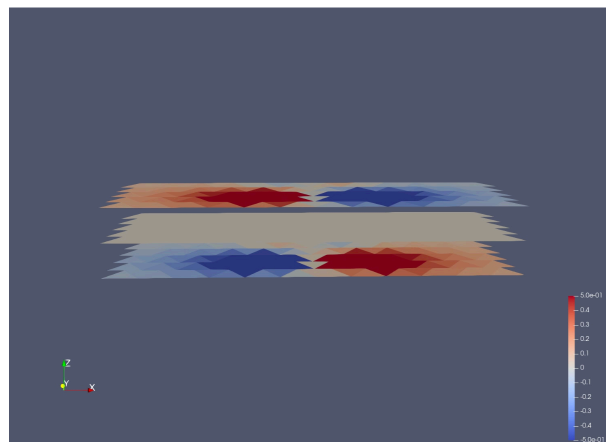
手始めに、上記クラスターサイズをそれぞれの軸方向に2分割して計8個のクラスターを設定し、応力時空間変化を計算した。その結果、Domain Sについては厳密解に近い結果が得られたが、それ以外のドメインについては誤差がより大きいという結果となった。学会発表では、クラスタリングや量子化、ARTなど複数ある近似の、最終的な応力値における誤差への依存性を詳しく評価した結果を報告する予定である。

$$c_x=c_y=c_z=2 \quad \sigma_{11} \text{成分}$$

厳密解



近似解

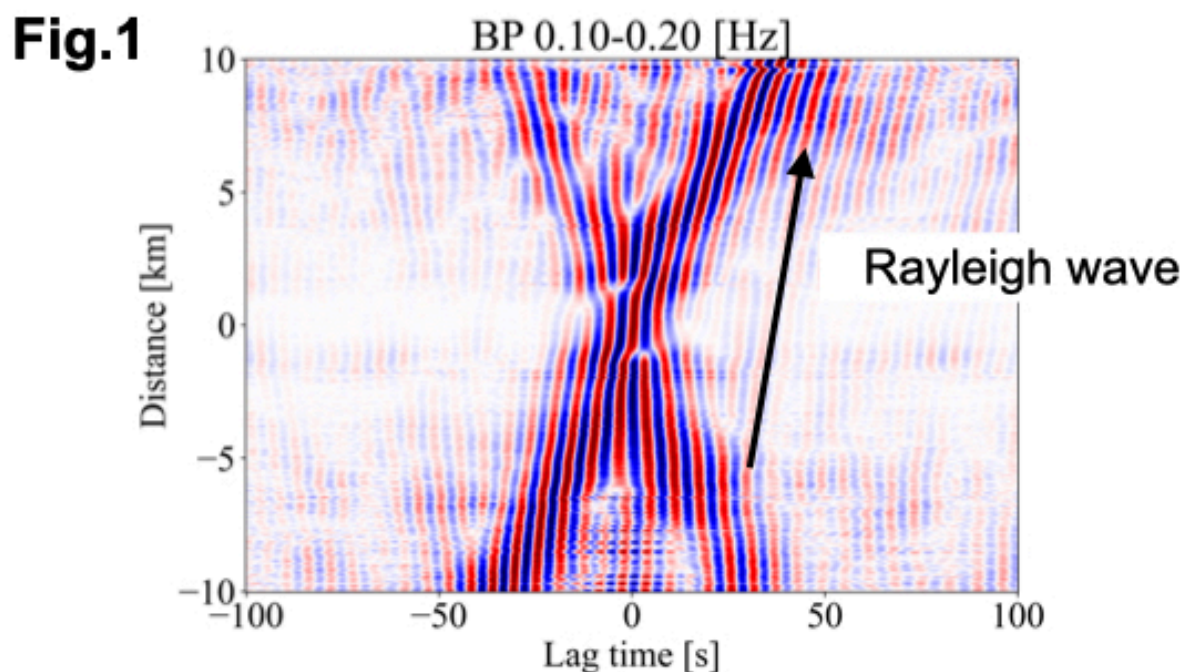


## Formularization of spatial autocorrelation for DAS and 3C seismometer and application to seafloor cable data off Sanriku

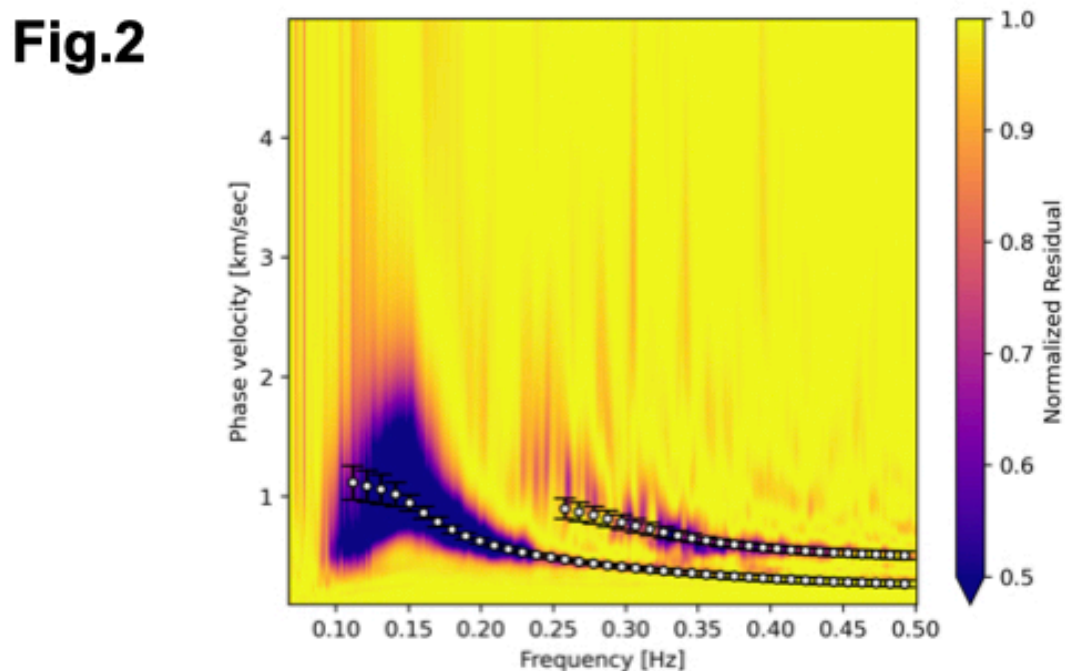
\*Shun FUKUSHIMA<sup>1,2</sup>, Masanao SHINOHARA<sup>2</sup>, Tomoaki YAMADA<sup>2</sup>, Kiwamu NISHIDA<sup>2</sup>, Akiko TAKEO<sup>2</sup>, Kiyoshi YOMOGIDA<sup>3</sup>

1. Department of Earth and Planetary Science, The University of Tokyo, 2. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 3. Hokkaido University, Graduate school of Science, Department of Natural History Sciences

近年、光ファイバをセンサとして、歪みを数m間隔で数十kmの長距離観測が行えるDistributed Acoustic Sensing（以下 DAS）が地球科学分野に応用されつつある（e.g., Zhan 2019）。これまで、我々は海底ケーブルにおけるDASデータに対して地震波干渉法を適用し、抽出した表面波から堆積層・最上部地殻のS波速度構造を高分解能に推定してきた(Fukushima et al. 2022)。これまでの研究は、抽出される表面波はレイリー波であると仮定してきた(Fukushima et al. 2022)。しかし、Nakahara et al. (2020)は歪み記録のspatial autocorrelation (以下SPAC)の定式化により、DASデータに対して地震波干渉法を行った場合、レイリー波に加えてラブ波も抽出され、観測点間隔が波長に対して、十分に離れていない場合にはラブ波の影響は無視できない可能性があることを示した。しかしながら、DAS記録だけではファイバー軸方向1成分記録であるため、レイリー波とラブ波の分離が困難である。本研究では、DAS記録と3成分地震計間のSPACについて定式化を行い、その結果、ファイバー軸方向と地震計設置方向のなす角度に応じた補正項が必要であることがわかった。さらに、DAS記録と地震計上下動成分に対して地震波干渉法を行うことで、レイリー波だけが抽出され、DASと地震計のトランスバース成分の地震波干渉法では、ラブ波が主に抽出されることを示した。レイリー波のみを抽出するために、東京大学地震研究所が所有する光ケーブル式海底地震・津波観測システムを利用したDAS観測記録と同ケーブルシステム上の海底地震計(SOB01)の上下動記録に対して地震波干渉法を適用し(Fig.1)、レイリー波の位相速度を、定式化したSPACを適用して推定した(Fig.2)。これまでの研究(Fukushima et al., 2022)では、ラブ波を考慮していない歪みSPACからレイリー波の位相速度を推定している。本研究から求めたDAS-地震計上下動のSPACから推定した結果を比較した。その結果、周波数0.1-0.2Hz間では、それぞれの位相速度はブートストラップ法により推定した誤差の範囲内であり、研究対象地域の場合、DAS-DAS記録間で地震波干渉法を行った場合のラブ波の影響は小さいことが確認された。今後、DASと通常の地震計を組み合わせることで、海域における3次元的なS波速度構造を高分解能に推定できると考えられる。さらに、DASと地震計を組み合わせることでレイリー波とラブ波の分離が可能であるため、鉛直異方性構造の推定への応用が期待できる。



- Fig1. Calculated correlation between DAS and vertical component of OBS03 at the frequency range between 0.1-0.2 Hz. We will showed only Rayleigh waves can be extracted using the seismic interferometry between DAS data and a seismometer from formularization of SPAC.



- Fig2. Dispersion curves of fundamental and first-higher modes of the Rayleigh waves estimated from formulated SPAC in this study.

# Formulation of the mixed cross-correlations between displacement and DAS axial strain

\*Hisashi NAKAHARA<sup>1</sup>, Matthew M. Haney<sup>2</sup>

1. Graduate School of Science, Tohoku University, 2. Alaska Volcano Observatory, USGS

## はじめに

分散型音響計測（DAS）は光ファイバーケーブルに沿った軸歪（速度）の時系列を長距離にわたって稠密に測定できることから、地震学分野でもその利用が広がっている。DASで測定される軸歪は、通常地震計により観測される並進成分（変位など）とは異なるため、地震学でこれまでに使用されてきた手法を歪みに拡張する必要がある。我々は、DASで測定される軸歪に対して地震波干渉法を適用するための理論構築を行ってきた（Nakahara et al., 2021; Nakahara and Haney, 2022）。最近、DASの歪記録と通常地震計記録とを併用した地震波干渉法解析が提案され、数値計算と実際のデータ解析が行われた（Nayak et al., 2021）。本研究では、SPAC法に基づいて、DAS記録と変位記録とのクロススペクトル（周波数領域での相互相関）を解析的に表現することに成功したので、その結果について報告する。

## 定式化と結果

問題設定は次のとおりである。原点にDASのチャンネルがあり、そこで軸歪  $e_{rr}$ （方向は任意に設定可）を測定するものとする。また、原点からx軸方向に距離  $r$  だけ離れた点に通常地震計を置き、そこで変位3成分  $u_r, u_\theta, u_z$  を測定するものとする。これらの観測点に、さまざまな方向からレイリー波、ラブ波の平面波が入射するものとする。このような問題設定に対して、先行研究（Nakahara et al., 2021）の手法にほぼ従った定式化を行う。その結果、軸歪と変位3成分とのクロススペクトルを解析的に導出することができた。

その結果、変位の上下動成分と軸歪との相関は、レイリー波のみが寄与することが分かった。そのため、上下動成分を用いると、ラブ波の影響を受けずにレイリー波の分散曲線の推定を高精度に行えるものと考えられる。また、等方成分の項は偶数次のベッセル関数で表現される。一方、変位の水平動2成分を用いた場合、軸歪との相関には、レイリー波とラブ波の双方が寄与することが分かった。ただし、観測点間距離が波長に比べて長いFar-fieldでは、特にDASの光ファイバーの軸方向に対して45°の角度をなす方向にある観測点でのトランスバース成分を用いると、ラブ波をうまく抜き出せることが分かった。このことはNayak et al. (2021)により数値計算に基づきすでに指摘されていたが、本研究でも理論的に確認することができた。一方、観測点間距離が波長に比べて短いNear-fieldの場合は、レイリー波、ラブ波ともに卓越することがわかった。これは本研究が初めて指摘する結果である。また等方成分の項は、奇数次のベッセル関数を含み、上下動成分の場合とは異なる。

## 相互相関の物理的意味（等方的波動場の場合）

地震波干渉法の理論に基づくと、等方的波動場に対しては、相互相関（クロススペクトル）とグリーン関数との間に明確な対応関係があり、相互相関の物理的な意味を理解することができる。Nakahara and Haney (2022)と同様の解析に基づき、本研究でも解釈を行うと、軸歪と変位とのクロススペクトルは、原点での軸方向のダイポール震源に対する観測点での変位のグリーン関数であることが示された。これにより、クロススペクトルの物理的意味が明らかになり、実際に解析において得られたクロススペクトルの解釈を行う上で有用である。

## 結論

最近、DAS記録と通常地震計記録とを併用した地震波干渉法解析が提案されており、本研究では、SPAC法に基づいてDAS記録と変位記録との相互相関について解析表現を得ることに成功した。また等方的波動場に対して、クロススペクトルの物理的意味を明らかにすることができた。

## Amplitude dependence of seismic wave attenuation

\*Hayato Tero<sup>1</sup>, Junichi Nakajima<sup>1</sup>

### 1. Tokyo Institute of Technology

$Q$ 値とは非弾性減衰を表し、過去の観測や室内実験から弱い周波数依存性があることが知られている。そして実験的研究により、非弾性減衰の主なメカニズムは粒界すべりであること、 $Q$ は大きなひずみ振幅に対して非線形な応答を示すことが明らかにされている。しかし、現在行われているあらゆる地震波の解析において、非弾性減衰が振幅に依存しないことを前提としている。そこで本研究では、地震波の非弾性減衰は本当に振幅に依存しないのかを、地震波の解析から求めることを目的とした。

2003 年宮城沖地震の余震と 2008 年岩手・宮城内陸地震の余震を解析対象とした。マグニチュードの幅は 3.0-5.3 である。まず震源が 5km 以内にある地震ペアを選択し、同一観測点における P 波初動のスペクトル比を計算した。次にそのスペクトル比を 2 つの地震の観測走時の平均で割り算し、震源距離の影響を取り除いた。最後に観測された振幅比がある幅（振幅比の常用対数で 0.2 毎）の中に入る全ての地震ペアをスタックすることで観測スペクトル比を計算し、それに理論スペクトル比をフィッティングすることで、観測振幅比の異なる地震間における平均的な  $Q^{-1}$  の差を決定した。

その結果、観測振幅比が 1 の地震ペアでは平均的な  $Q^{-1}$  の差はゼロであるのに対し、振幅比が大きくなるとその差が徐々に大きくなることがわかった。この観測振幅比と  $Q^{-1}$  の差に正の相関があるという結果は、地震波が非弾性減衰の振幅依存を強く示唆している。

**Room C | Regular session : S01. Theory and analysis method**

📅 Tue. Oct 25, 2022 2:00 PM - 3:30 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 5:00 AM - 6:30 AM UTC | 🏠 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S01] PM-1**

chairperson:Kiwamu Nishida(ERI, the university of Tokyo), Masahiro Kosuga(Hirosaki University)

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S01-11] Near-trench amplification of seismic waves from deep earthquakes in low-frequency band: comparison between observation and 2D simulation

\*Yuki Ihara<sup>1</sup>, Shiro Hirano<sup>1</sup>, Hironori Kawakata<sup>1</sup> (1. Ritsumeikan University)

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S01-12] Examination of broadband slant-stacked waveform with synthetic one by 3-D wave propagation and their application to focal depth estimation

\*Masahiro KOSUGA<sup>1</sup> (1. Graduate School of Science and Technology)

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S01-13] Extraction of P-s converted wave from teleseismic P-wave microseisms

\*Shota KATO<sup>1</sup>, Kiwamu Nishida<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo)

2:45 PM - 3:00 PM JST | 5:45 AM - 6:00 AM UTC

[S01-14] On the sensitivity kernels for Rayleigh wave azimuthal anisotropy

\*Hitoshi KAWAKATSU<sup>1,2</sup> (1. Earthquake Research Institute, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

[S01-15] Ocean external gravity wave excited by the 2022 eruption of Hunga volcano, Tonga

\*Kiwamu NISHIDA<sup>1</sup>, Takashi TONEGAWA<sup>2</sup>, Tatsuya KUBOTA<sup>3</sup>, Mie ICHIHARA<sup>1</sup> (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. NIED)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

[S01-16] Eruption sequence of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano from P-wave back-projection: Atmospheric coupling mode and eruption cycles

\*Kazunori YOSHIZAWA<sup>1,2</sup>, Kotaro TARUMI<sup>2</sup> (1. Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University)

## Near-trench amplification of seismic waves from deep earthquakes in low-frequency band: comparison between observation and 2D simulation

\*Yuki Ihara<sup>1</sup>, Shiro Hirano<sup>1</sup>, Hironori Kawakata<sup>1</sup>

1. Ritsumeikan University

地震の揺れは一般に、震央から離れるにつれて弱まるような同心円状の震度分布を示すが、例えば、スラブ内で地震が発生した際には、それとは異なる、「異常震域」と呼ばれる震度分布を示すことがある。遠方での地震動増大は、主に数Hz以上の高周波帯域において顕著に観察され、地下の散乱構造、非弾性減衰構造に起因するとされている (Furumura and Kennett, 2005)。日本陸域において異常震域は観測され議論がなされているが、陸域から海溝にかけての、海域については十分な議論がなされおらず、陸域を離れてどこまでの領域でどのように振幅が増大しているかなどは、よくわかっていない。このことは、海域における地震波観測網が充実していなかったことに起因するが、2016年8月15日以降は、防災科学技術研究所の日本海溝海底地震津波観測網S-net (<https://doi.org/10.17598/nied.0007>) による観測データが公開されている。そこで本研究では、深発地震による地表面最大振幅を陸域-海溝にかけての、地表面の最大振幅分布を高感度地震観測網Hi-net (<https://doi.org/10.17598/nied.0003>) と日本海溝海底地震津波観測網S-netを用いて調べた。その結果、4~8Hzの帯域については、いわゆる異常震域のような振幅増大が陸域から海溝にかけて見られたが、0.25~0.5Hzの帯域については、陸域では振幅が減少し、海溝付近で振幅が増大する現象が見られたため、卓越周波数0.25Hzとして、深発地震についての2D波動伝播シミュレーションを行った。

深発地震の観測データとして、2017年7月13日4時48分頃に日本海で発生した、震源深さ603km, M6.3の地震と、2021年9月29日17時37分頃に日本海で発生した、震源深さ394.4km, M6.1を使用した。ただし、Hi-netとS-netでは計器の周波数応答が異なるため、Maeda et al. (2011) を参考に、S-netのHi-net化処理を行った。S波の最大速度振幅に着目し、海溝軸に直行する方向に最大振幅の分布を確認したところ、4~8Hzの帯域については、いわゆる異常震域のような振幅増大が陸域から海溝にかけて見られた。しかし図1aに例を示すように、0.25~0.5Hzの帯域については、陸域では振幅の減少、海域では振幅の増大が見られた。近地地震で同様の最大速度振幅の分布図を作成したところ、Hi-netとS-netで系統的には、それぞれ幾何減衰が見られるものの、陸域と海域間での明確なステップが確認できた。この原因として、陸域と海陸で地盤増幅率や計器と地盤とのカップリングが異なる可能性が考えられ、これらを除くために、2018年8月19日9時19分にフィジーで発生した、震源深さ600km, M8.2の遠地地震の観測データとの比をとった。そうしたところ、近地地震についてはHi-netとS-netで連続的に海溝にかけて単調に減少する結果が得られた。深発地震については、図1bに例を示すようにHi-net, S-netで震央から離れるにつれて最大振幅は減少していくが、海溝付近において振幅の増大が見られた。

この低周波での振幅増大がどのような地下構造によって引き起こされたものなのかを明らかにするために、卓越周波数0.25Hzとして、深発地震についての2D波動伝播シミュレーションを行った。また放射パターンの影響をなくすために、震源では等方S波を発生させ、数値計算にはMaeda et al. (2017) によるOpenSWPCを使用した。計算領域は、水平2500km、鉛直700kmの断面とした。速度構造はak135 model (Kennett et al., 1995) を参考に作成した。また、プレート形状は双曲線で近似し、プレート内部の値はFurumura et al. (2016) を参考に周囲よりも2%大きいとした。非弾性減衰を示すQ値はFurumura et al. (2016) を参考に、マントルウェッジを $Q_p=150$ ,  $Q_s=100$ , その他のマントルを $Q_p=450$ ,  $Q_s=330$ , プレート内部を $Q_p=1600$ ,  $Q_s=1200$ とした。以下の4通りの組み合わせについてシミュレーションを行った：

- ①速度構造：均質、非弾性構造：無し、
- ②速度構造：1次元速度構造、非弾性構造：無し、

③速度構造：1次元速度構造&プレート形状，非弾性構造：無し，

④速度構造：1次元速度構造&プレート形状，非弾性構造：あり．

パターン②について，図1cに示すように，-300～0km辺りにおいて振幅増大が見られることから，プレート形状や非弾性減衰に依らず，1次元速度構造の影響により振幅増大が引き起こされていると考えられる．この振幅の増大は地表面でのsP変換がある地点で臨界角を迎え，さらにそれがモホ面やコンラッド面にトラップされることで引き起こされたと考えられる．しかし，この振幅増大域は観測結果よりも広範囲にわたって現れている．プレート形状の影響により，パターン③に示すように，海溝付近の比較的狭い領域で振幅増大が見られ，観測と比較的一致した(図1b)．パターン④について，振幅増大域はパターン③とほぼ一致したが，陸域での振幅の減少が見られない結果となった(図1b)．海溝付近で振幅が増大するという定性的な面は観測とシミュレーションで一致し，これは散乱や非弾性減衰の構造，震源の放射パターンに依らずとも再現が可能な現象であった．

謝辞：本研究はJSPS科研費JP22H01336の助成を受けたものである．

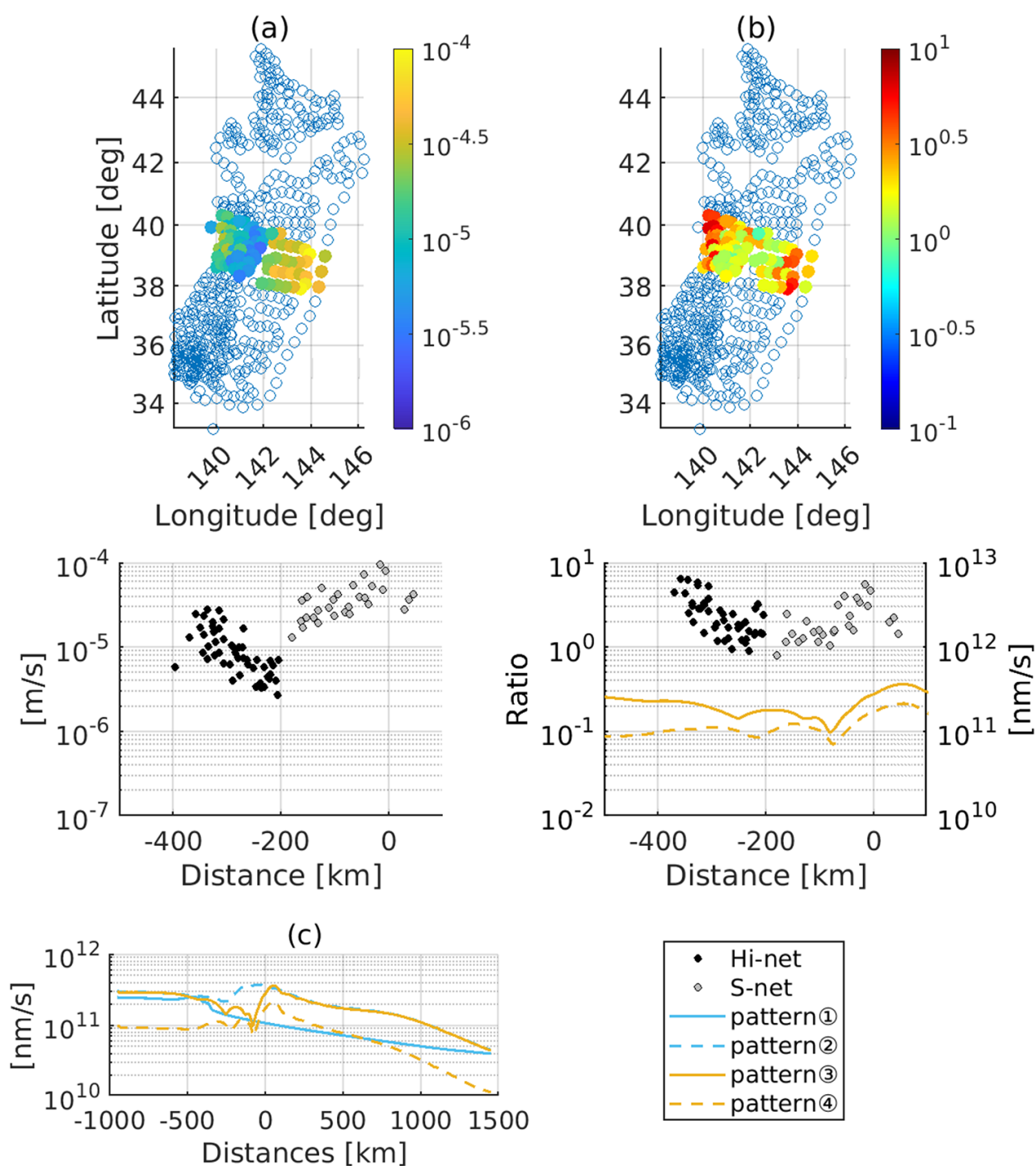


図1. (a): 2017年7月13日4時48分に日本海で発生した、震源深さ603 km, M6.3の深発地震の最大振幅分布図. 横軸は沖側を正とする、海溝からの距離. (b): (a)を2018年8月19日9時19分にフィジーで発生した、震源深さ600 km, M8.2の遠地地震で規格化した図. (c): シミュレーションによる地表面最大振幅図.

# Examination of broadband slant-stacked waveform with synthetic one by 3-D wave propagation and their application to focal depth estimation

\*Masahiro KOSUGA<sup>1</sup>

## 1. Graduate School of Science and Technology

### 1. はじめに

走時データを用いた震源決定において、震源上方に観測点が存在しない場合の震源深さは、地震発生時刻とのトレードオフのため精度良く推定することが困難である。これは海域で発生した地震において深刻な問題であった。それはS-net観測点でのデータを用いることで解消された地域があるとは言え、過去に発生した地震に対する状況は変わっていない。これまで、さまざまな地表（海面）変換波が海域地震の震源深さの精度向上に用いられてきたが、目視で確認できる周波数帯の利用に限られていたのに加え、変換波の波動場の利用例はほとんどない。一方、特性の揃ったHi-net観測網の波形記録を広帯域化すると、多数の後続波が空間的に連続した波動として検出できることがわかってきた。前報（JpGU2022）では、広帯域化した波形のslant-stackを行うことで各地震の波形を単純化し、波形相関によって分類された地震の空間分布・CMT解・波形の特徴の検討を行なった。今回は、3次元地下構造を仮定した波動伝播シミュレーションによって計算した波形に対しても同じ処理を行い、観測スタック波形がシミュレーションによってどの程度再現可能なのかを調べた。また、シミュレーションのスタック波形が震源深さに対して系統的に変わる性質が震源の深さ推定に適用可能なことがわかったので報告する。

### 2. データ処理

波形に対して、地震計の特性補正・フィルタリング・auto gain controlを行った後でスタッキングを行った。フィルターの帯域は0.02-0.2, 0.05-0.5, 0.1-1.0 Hzの3通りを用いた。スタッキングは見かけ速度7.0~9.0 km/sまで0.4 km/sごとの6通りに対して行った。スタッキングは震央からの距離が400 km以内で、エンベロープ振幅のS/N比が設定したしきい値を超えている観測点の波形に対して行った。シミュレーションにはOpenSWPC（Maeda et al., 2017）を用いた。3次元地下構造は全国1次地下構造モデル（JIVSM）（Koketsu et al., 2012）を用いた。震央から400 km以内のHi-net観測点に対して計算された波形に対しても、観測波形と同様な処理を行った。対象地震は、岩手県中部の沖（39.53N, 143.56E, 15.7 km, M5.0）、宮城県北部の沖（38.66N, 142.15E, 42.1 km, M4.5）、および宮城県中部の沖（38.13N, 143.49E, 16.3 km, M5.0）の、いずれもプレート境界付近で発生した地震とした。震源位置・マグニチュード・メカニズム解は、気象庁CMT解のセントロイド位置・モーメントマグニチュード・ダブルカップル成分を与えた。

### 3. 観測とシミュレーションによるスタッキング波形の比較

シミュレーションによるスタッキング波形は、長周期の波、それより大振幅の中間周期の波、および小振幅で短周期の波の重なりと見ることができる。長周期の波が明瞭なのは規模が大きい地震に対して長周期のフィルターをかけた場合で、周期は20 s程度、振動の継続時間は50 s程度である。中間周期の波の周期は5 s前後で、相対的に小さい見かけ速度でのスタッキング波形において明瞭である。観測スタッキング波形と比較すると、両者がよく似ているのは、見かけ速度の範囲が7.0~8.2 km/sで初動から30 s程度の時間範囲内であることがわかった。見かけ速度がそれよりも速くなると、シミュレーション波形の中間周期の波の振幅は次第に小さくなる。また、シミュレーション波形では初動から30 s以降にも振幅の大きい後続波が見られるが、観測波形では明瞭な波動は見られない。ただし、これが一般的な傾向かどうかは他の地震に対するシミュレーションも行って検討する必要がある。

### 4. 震源深さ推定の試み

震源深さを変えてシミュレーションを行い、スタック波形の変化を確認した。それによると、中間周期の波の山谷の間隔（周期）が、震源が深くなると系統的に長くなることがわかった。これは、震源から後続波生成源までの距離が深さとともに長くなるためと解釈できる。この性質を使うと、観測スタック波形との相関から

震源深さを推定することができる。すなわち、震源深さと相関係数の関係は単一の山を有する2次関数的な形になると期待されるので、相関係数を深さの多項式で近似することで、相関が最大となる深さを決めることができ、それを震源深さと見なすことができる。

#### 5. おわりに

観測スタック波形の主要な部分はシミュレーション波形においても再現できることが確認できた。また、シミュレーション波形の中間周期の波の周期が仮定した震源深さとともに系統的に変わることがわかった。この性質を用いると、海域で発生した地震の震源深さを精度良く推定できる可能性がある。今後は多数のシミュレーションによってこれらの結果の一般性を確認し、3次元的な震源位置の推定方法の検討が課題である。

#### 謝辞

本研究では防災科研H-netの観測波形と気象庁CMT解カタログを使用した。波動伝播シミュレーションには東京大学地震研究所のEIC計算機システムを利用した。（公財）地震予知総合研究振興会からは研究費の援助をいただいた。以上の機関に感謝します。

## Extraction of P-s converted wave from teleseismic P-wave microseisms

\*Shota KATO<sup>1</sup>, Kiwamu Nishida<sup>1</sup>

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo

脈動は0.05-0.3 Hzの帯域で海洋波浪によって励起されるランダムな波動場である (e.g., Nishida, 2017)

。0.1-0.3 Hzの帯域の脈動はsecondary microseismと呼ばれ、波浪の非線形相互作用に伴う圧力変動によって励起される。そのためRayleigh波とP波の励起が卓越することが知られている。脈動は従来地震波形に対するノイズとして扱われてきたが、近年では地震波干渉法によって地球内部構造の推定に用いられるようになった (e.g., Shapiro et al., 2004, Poli et al., 2012)。地震波干渉法解析では、観測点間の観測波形の相互相関関数を計算することにより、観測点間のグリーン関数を抽出する (Snieder and Larose, 2013)。しかし、地震波干渉法によって観測点間を伝播する実体波を抽出し地球内部構造を推定する場合、脈動実体波の非一様な波源分布や観測網の配置によっては相互相関関数に見かけ上の波が出現し、グリーン関数の推定において問題となることが知られている (e.g., Pedersen and Colombi, 2018, Li et al., 2020)。

そこで、本研究では0.1-0.25 Hzでの脈動P波を空間的に局在化したイベントとみなし、レシーバー関数解析手法を適用し、日本列島直下の構造推定を試みた。ここで、脈動P波の波源は地震のように空間的に局在化しているが、震源時間関数は数日スケールで継続的であると仮定し、観測点下の不連続面でのP-s変換波を抽出するため、脈動P波に適した新たなレシーバー関数解析手法を開発した。

解析に用いた観測波形は、防災科学技術研究所の展開する高感度地震観測網Hi-netの北海道を除く687点の上下動・水平動の速度計記録である。解析対象とした脈動P波のイベントは、0.1-0.25 Hzの全球的な脈動P波カタログ (Nishida and Takagi, 2022) から信号/ノイズ比の良いもの6000イベントとした。波源の位置はカタログで仮定した継続時間 (6時間) 内で一定であると仮定した。全観測点の上下動波形記録から1024秒の時間窓を切り出し、脈動P波の走時に沿って足し合わせることで入射P波を推定し、震源時間関数とみなした。脈動P波の走時の計算には1次元速度構造モデルAK135 (Kennett et al., 1995) と日本列島の3次元速度構造モデル (Nishida et al., 2008) を用いた。各観測点でのレシーバー関数は水平動成分を震源時間関数でデコンボリューションすることで求めた。

この手法の有効性を検証するため、QSEIS (Wang, 1999) を用いて仮想的な脈動P波の波形を計算し同様なレシーバー関数解析を行った。速度構造をAK135とし鉛直方向のシングルフォースによるグリーン関数にランダムな震源時間関数を畳み込むことで仮想的な脈動P波波形を計算した。点震源を1つ置く場合、点震源が空間的に分布している場合の双方について計算を行った。計算の結果、点震源が空間的に分布している場合であっても十分な数の時間窓があれば点震源を1つ置く場合と同様P-s変換波を確認することができた。

次に、得られたレシーバー関数について深度変換を行った。速度構造AK135を仮定し、深さ200-1000 kmにおけるP-s変換波のPに対する相対走時を $\tau_{\text{P-s}}$  toolkit (Crotwell et al., 1999) によって計算し、計算したP-s変換波の相対走時に沿ってレシーバー関数を足し合わせることで深度方向への変換を行った。波源の領域 (北大西洋、北太平洋、南太平洋) ごとに全観測点のレシーバー関数の深度変換を行い重合した結果、共通して410 km不連続面、660 km不連続面に対応するピークを確認できた。さらに、深度変換したレシーバー関数から日本列島の東西断面図を作成したところ、連続的に410 km不連続面、660 km不連続面を確認することができた。今後は、不連続面の空間分布について議論を進める予定である。

## On the sensitivity kernels for Rayleigh wave azimuthal anisotropy

\*Hitoshi KAWAKATSU<sup>1,2</sup>

1. Earthquake Research Institute, 2. Institute of Earth Sciences, Academia Sinica

For the investigation of the oceanic lithosphere-asthenosphere system employing regional OBS array data, it is essential to resolve azimuthal anisotropy as well as radial anisotropy (e.g., Takeo et al., 2018). Considering the presence of strong sub-Moho anisotropy both in  $P_n$  and  $S_n$ , it is important to analyze both P and S anisotropy for Rayleigh waves as the phase velocity is quite sensitive to the shallow-most P-wave structure. It is well established that, in the case of weak anisotropy, the sensitivity kernels of azimuthal anisotropy have the same form as those for the corresponding VTI parameters (Montagner and Nataf, 1986). This may be understood as that, within the framework of the first order perturbation theory, the eigenfunction is unchanged and thus the phase velocity change is expressed in terms of the equivalent VTI parameters within the plane of the wave propagation. Recently, Russell (2021, Ph.D. Thesis, Appendix E, F) discussed how parameterizations using Love parameters ( $\delta A(B)$ ,  $\delta L(G)$ ,  $\delta N(E)$ ,  $\delta F(H)$ ) due to (Montagner and Nataf, 1986) and those using velocity perturbation ( $\delta \alpha_H$ ,  $\delta \beta_V$ ,  $\delta \beta_H$ ,  $\delta \eta$ ) due to (Takeuchi and Saito, 1972) might be related for azimuthal anisotropy. After pointing out that solving for  $\delta \beta_V / \beta_V$  (or  $\delta \alpha_H / \alpha_H$ ) on its own is not equivalent to solving for G/L (or B/A) because of the presence of the  $\delta F$ -term, they suggest assuming  $\delta \eta / \eta \sim 0$  for inversion. However, the assumption  $\delta \eta / \eta = 0$  is exactly the reason why the usage of the conventional  $\eta$  introduces the unpreferable behavior of P-wave kernels that is contaminated by the S-wave sensitivities (Kawakatsu, 2016) and unjustifiable; also existing mantle fabrics show a strong azimuthal dependence for  $\delta \eta / \eta$ . Instead, we suggest using the parameterization involving the new fifth parameter  $\eta_\kappa$ , i.e., ( $\delta \alpha_H$ ,  $\delta \beta_V$ ,  $\delta \beta_H$ ,  $\delta \eta_\kappa$ ). Because the fifth parameter is difficult to constrain, it might be more practical to omit the corresponding term in the inversion, which is equivalent to assume  $\delta \eta_\kappa / \eta_\kappa \sim 0$ , meaning azimuthal independency of the "ellipticity" parameter  $\eta_\kappa$  that offers a physical background of the modeling. Also, the aforementioned fabrics show a much weaker azimuthal dependency for  $\delta \eta_\kappa / \eta_\kappa$  compared to that for  $\delta \eta / \eta$ . This approach may be useful for the scaling of S- and P-wave azimuthal anisotropy to reduce the number of parameters in the Rayleigh wave inversion.

## Ocean external gravity wave excited by the 2022 eruption of Hunga volcano, Tonga

\*Kiwamu NISHIDA<sup>1</sup>, Takashi TONEGAWA<sup>2</sup>, Tatsuya KUBOTA<sup>3</sup>, Mie ICHIHARA<sup>1</sup>

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. JAMSTEC, 3. NIED

2022年1月15日、海底火山であるフンガ火山で大規模な噴火が発生した。噴煙は中間圏までに達し、顕著な大気Lamb波を励起した。大気Lamb波は海面変動を引き起こし、特異な津波として観測された。このような大気波動と津波のカップリング現象は、1883年クラカタウ噴火時にも観測されたが、現代的な観測によって捉えられたことは初めての事であった。また、今回の2022年フンガ火山の噴火に伴う振動現象を理解する上で、大気波動と津波、地球自由振動など、多圏にわたるカップリングが重要な役割を果たしている事が分かってきた。

噴火を理解する上で、噴火の推移を推定することは重要である。火山近傍で地震・空振観測記録があれば理想的であるが、海洋島での観測は限られているのが現状である。例えば遠地の空振観測による噴火推移の推定もなされているが、伝播の複雑性が定量的な議論の妨げとなっている。今回の噴火では、特に長周期帯域(<10mHz)では、多圏にわたるカップリングが波動の伝播を複雑にしており、噴火の推移の推定の障壁になっている。海洋外部重力波の短周期成分(0.015-0.05Hz)は、津波と異なり位相速度が100m/s以下と遅いため、大気とのカップリングの効果が弱い。そのため、単純なモデリングによる定量化が可能である。本研究では、海洋外部重力波の解析から噴火の推移を制約する事を目的とする。

本研究では、まずS-net、DONETの水圧計を解析した。これらの観測点では0.015-0.05Hzの周波数帯域で正の分散性をもつ海洋外部重力波の検出に成功した。0.015Hzでは噴火からおおよそ2日後、0.04Hzではおおよそ5日後に到来している事を確認した。海洋島の広帯域地震計記録(青ヶ島、南大東島等)でも同様の波が記録されていた。これは、海洋外部重力波によって海洋島が荷重変形しており、これを広帯域地震計が捉えていたためである(e.g., Hanson and Bowman 2005)。噴火の規模を見積もるため、WKB近似によりGreen関数を推定し(e.g., Dahlen and Tromp 1998)、S-net波形記録をモデリングした。観測値を説明するには、おおよそ1E10N程度の大きさのランダムな鉛直方向のシングルフォースが必要であることが分かった。海洋外部重力波の励起はUTC 4:00からはじまり5時間ほど継続したのち、UTC8:40頃に小規模な噴火を励起していたことも分かった。またそれらに加え、5-10mHzの帯域で津波は、海洋外部重力波に比べて2時間ほど遅れて励起されていることも明らかとなった。今後、これらの観測事実をもとに、噴火の推移を考察する予定である。

# Eruption sequence of the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano from P-wave back-projection: Atmospheric coupling mode and eruption cycles

\*Kazunori YOSHIKAWA<sup>1,2</sup>, Kotaro TARUMI<sup>2</sup>

1. Department of Earth & Planetary Sciences, Faculty of Science, Hokkaido University, 2. Department of Natural History Sciences, Graduate School of Science, Hokkaido University

2022年1月15日（UTC）に発生したフンガトンガ・フンガハアパイ火山の爆発的噴火では、大気波動や気象津波など、大気・海洋・固体地球に渡る種々の振動現象が観測された。この噴火で発生した地震波も世界中の観測点で明瞭に記録されている。振幅の大きい表面波の波形記録から、複数の爆発噴火の発生が示唆されるが、長周期の分散性表面波では、小規模な爆発噴火の発生時間も含めた噴火全体のプロセスを知ることは難しい。本研究では、遠地で記録されたP波のback-projection（BP）解析により、爆発噴火のシーケンスを推定し、大気-固体カップリングによる振動周期との関連性も調べる。

本研究では、0.03~0.08Hzの遠地P波を用いてBP解析を行った。IRIS DMCから入手した世界各地の地震観測点の鉛直成分記録について、最初に発生した大規模噴火を基準として、波形の相関処理を行った上で、241観測点での波形記録を抽出した。走時補正にはAK135モデルを用いる。また噴火による遠地P波の極性は方位によらないことから、震源はsingle forceによるものと仮定し、極性の補正は行わない。これらの波形記録を用いて4-th root stackの方法でBP解析を行った。その結果、他の地震波フェイズがP波と重なっている状況下でも、複数の爆発や地震に関連するイベントを検出できた。

BP解析の結果から、一連の爆発噴火のシーケンスは2つのグループに分けられることがわかった。1番目のグループは04:02 UTC頃に始まった後、04:15 UTC頃とその200-300秒後に大規模な爆発が起こり、04:35 UTC頃まで確認できる。2番目のグループは約4時間後（08:26 UTC）に始まり、08:31 UTC頃に最後の大規模な噴火が発生している。本研究で推定された爆発噴火の発生時刻は、周期100秒以下の表面波の波群とも整合的である。

特に1番目のグループに分類された大規模な爆発噴火の発生時間の間隔は主に約270秒であった。この発生間隔の周期は大気-固体カップリングモード(OS29)の固有振動数3.7mHzとほぼ一致する。この噴火で観測された鉛直成分の振幅スペクトルでは、よく知られているもう一つの大気-固体カップリングモード(OS37, 4.4mHz)に比べ、3.7mHzの方が特に顕著なピークを示している。本研究の結果から、爆発噴火の発生サイクルが、OS29モードの固有周期と強く同期していたことが示唆される。

**Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity**

📅 Tue. Oct 25, 2022 3:45 PM - 4:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 6:45 AM - 7:45 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S03] PM-2**

chairperson: Yuya Machida(JAMSTEC), Yohei Kinoshita(University of Tsukuba)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

[S03-01] Experimental characterization of sensor drift of pressure gauges using a pressure standard

\*Hiroyuki MATSUMOTO<sup>1</sup>, Hiroaki KAJIKAWA<sup>2</sup>, Keisuke ARIYOSHI<sup>1</sup>, Eiichiro ARAKI<sup>1</sup> (1. JAMSTEC, 2. AIST)

---

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

[S03-02] Seafloor geodetic observation using the pressure gauges without inherent drift components in the Nankai trough seismogenic zone

\*Yuya MACHIDA<sup>1</sup>, Shuhei Nishida<sup>1</sup>, Hiroyuki Matsumoto<sup>1</sup>, Araki Eiichiro<sup>1</sup> (1. JAMSTEC / IMG)

---

4:15 PM - 4:30 PM JST | 7:15 AM - 7:30 AM UTC

[S03-03] Shallow slow slip and associated VLFE activity observed by seafloor fiber optic strainmeter in the Nankai Trough.

\*Eiichiro ARAKI<sup>1</sup>, Takashi Yokobiki<sup>1</sup>, Satoru Baba<sup>1</sup>, Yojiro Yamamoto<sup>1</sup>, Mark Zumberge<sup>2</sup>, Shuhei Nishida<sup>1</sup>, Yuya Machida<sup>1</sup>, Hiroyuki Matsumoto<sup>1</sup> (1. JAMSTEC Institute for Marine Geodynamics, 2. Scripps Institution of Oceanography)

---

4:30 PM - 4:45 PM JST | 7:30 AM - 7:45 AM UTC

[S03-04] Sentinel-1 SAR observation at the northern Noto peninsula associated with active seismicity since the end of 2020

\*Yohei Kinoshita<sup>1</sup> (1. University of Tsukuba)

## Experimental characterization of sensor drift of pressure gauges using a pressure standard

\*Hiroyuki MATSUMOTO<sup>1</sup>, Hiroaki KAJIKAWA<sup>2</sup>, Keisuke ARIYOSHI<sup>1</sup>, Eiichiro ARAKI<sup>1</sup>

1. JAMSTEC, 2. AIST

DONETやS-netの圧力計は圧力変化を高分解能で計測できるため、巨大地震発生の準備過程で発生する鉛直方向の地殻変動を計測できることが期待されている。しかしながら、圧力計はドリフト（校正値の経時変化）が発生することが知られており、地殻変動を計測するためには圧力校正が必要である。このドリフトによる誤差を補正するために、加圧－大気圧開放（ゼロ）－加圧のパターンを繰り返し、ゼロ点でのドリフトで加圧時のドリフトを補正する手法（A－0－A方式）があり、すでに海域での試験報告がある（太田ほか、2021）。

本研究では、複数タイプの圧力計に重錘形圧力天びんから一定圧力を連続印加して、ドリフト特性について考察する。室内実験ではDONETやS-netで採用されている水晶振動子を受圧部にもつ「水晶振動式圧力計」と主に産業分野で採用されてきたシリコン単結晶の半導体素子を受圧部にもつ「シリコン振動式圧力計」を計測した。水晶振動式圧力計は3式の8B7000-2-005（Paroscientific社）を、シリコン振動式圧力計は4式のEJX610A（横河電機社）ならびに3式のMT300（横河計測社）を準備して、合計10式の圧力計に重錘形圧力天びんから同時に加圧した（図1）。圧力計はすべて室温環境に設置して計測を行った。8B7000-I-005とEJX610Aは絶対圧力計であるのに対し、MT300はシールドゲージ圧計である。室内実験では、A－0－A方式の加圧パターンで印加した。具体的には、水深2,000 mに相当する20 MPaを約1ヶ月間連続印加して、1日1回約15分間だけ大気圧（ゼロ点）に開放する（図2）。20 MPaを連続印加しているときは重錘形圧力天びんによる基準圧力と圧力計の出力値との偏差を計算し、ゼロ点に開放したときは約10分間待機した後、4分間計測し重錘形圧力天びん内の大気圧計による基準圧力との偏差を計算する。

それぞれの圧力計について、加圧時とゼロ点の基準圧力との偏差の時系列変化の一例を図3に示す。黒点は加圧時の計測データ、赤線は加圧2日目からの指数項と線形項を組み合わせた近似曲線である（Watts & Kontoyiannis, 1990）。薄い黒点はゼロ点の計測データ、青線はその近似曲線である。シリコン振動式圧力計はゼロ点に開放することで、再加圧の直後には一時的にヒステリシスが観測されるが、間もなく元のドリフト曲線に漸近することがわかる。図3は圧力計の種類にかかわらず、一時的にゼロ点に開放しても連続印加の特性は保持されることを示唆する。約1ヶ月間の計測でそれぞれの圧力計のドリフト特性が認識できる。図4に圧力計の雰囲気温度を示すが、8B7000-I-005とEJX610Aの圧力偏差は温度変化に相関していることがわかる。MT300に長周期のゆらぎが観測されているが、雰囲気温度との明瞭な相関は見られない。図3の赤線の線形項の係数がドリフトの特性を表すが、20 MPaを連続印加したときの圧力計の係数は、(a) -0.09 hPa/日、(b) -0.12 hPa/日、(c) -0.10 hPa/日となっている。なおこれらは代表値ではなく、圧力計により個体差がある。

次に、ゼロ点の偏差の時系列変化について考察する。図3に青線で示した近似曲線の線形項の係数は、(a) -0.10 hPa/日、(b) -0.19 hPa/日、(c) -0.09 hPa/日となった。これは上述の20 MPa印加時の係数と調和的である。室内実験でA－0－A方式により、水晶振動式圧力計のドリフト特性を評価した研究はある（Kajikawa & Kobata, 2019）が、シリコン振動式圧力計でも加圧時とゼロ点のドリフト特性が一致することを確認できた。実験室の温度環境で温度特性が計測データに重畳されたが、本研究の室内実験の結果はシリコン振動式圧力計でもA－0－A方式が適用可能なことを示唆する。

謝辞：本研究の一部は、JSPS科研費（JP19H02411）の支援を受けている。

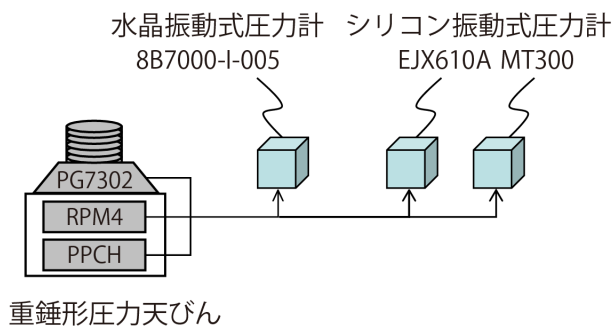


図 1：室内実験のダイアグラム図

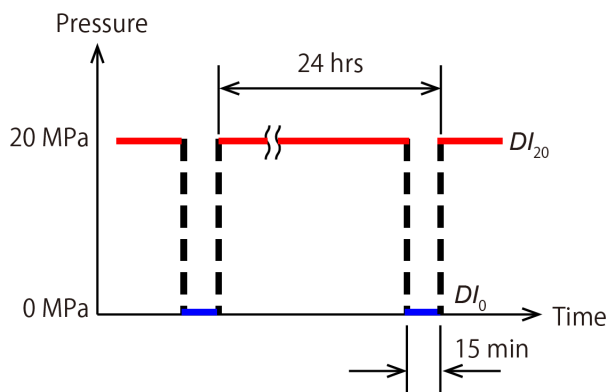


図 2：重錘形圧力天びんの加圧パターン

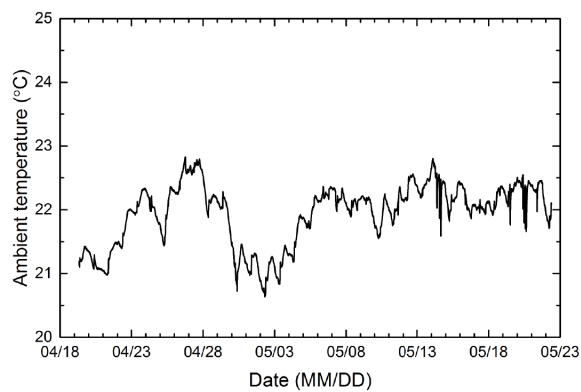
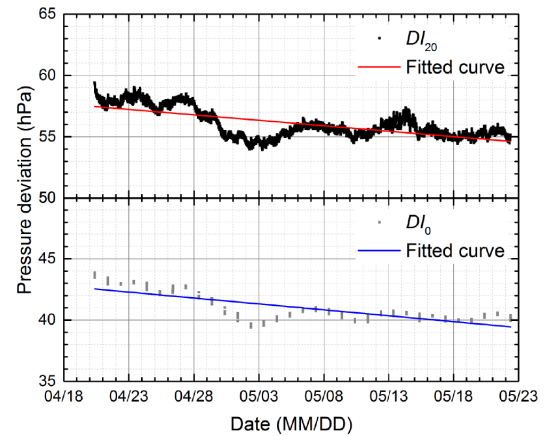
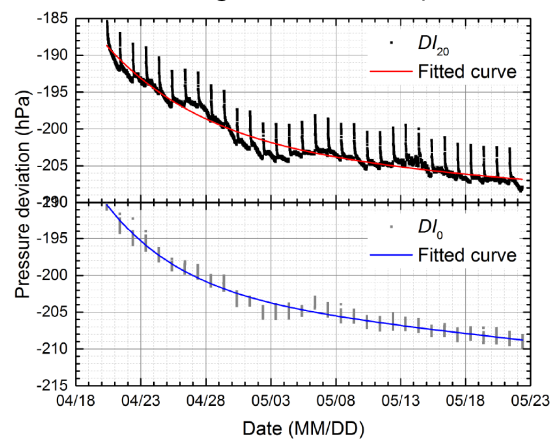


図 4：室内実験中の環境温度変化

(a) 8B7000-I-005/Paroscientific, Inc.



(b) EJX610A/Yokogawa Electric Corporation



(c) MT300/Yokogawa Test &amp; Measurement Corporation

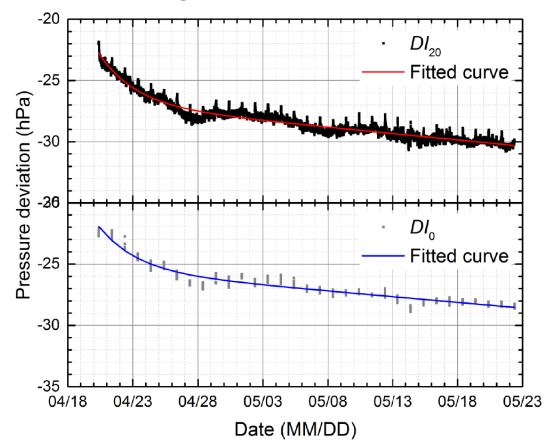


図 3：重錘形圧力天びんからの基準圧力との偏差。

(a) 水晶振動式圧力計、(b) シリコン振動式圧力計  
(絶対圧タイプ)、(c) シリコン振動式圧力計 (シー  
ルドゲージ圧タイプ)

## Seafloor geodetic observation using the pressure gauges without inherent drift components in the Nankai trough seismogenic zone

\*Yuya MACHIDA<sup>1</sup>, Shuhei Nishida<sup>1</sup>, Hiroyuki Matsumoto<sup>1</sup>, Araki Eiichiro<sup>1</sup>

### 1. JAMSTEC / IMG

海洋研究開発機構では南海トラフに展開されている地震・津波観測監視システム（DONET: Dence Oceanfloor Network system for Earthquake and Tsunamis）に接続された水圧計の校正を繰り返し実施し、水圧計に特有な機器ドリフト成分を水圧記録から切り分けることで長期的な海底地殻変動を捉える試みを行ってきた。DONET水圧計の校正には、絶対的な精度を持った水圧計とDONET水圧計が示す圧力を現場で比較する必要があるが、南海トラフでは年間1cm程度の地殻変動が期待されるため、校正作業を行うためには1cm以下の精度を持った高精度な水圧計が必要である。このため水圧計の計測の不確かさの主要因である圧力ヒステリシス、温度特性、姿勢の影響を最小にすることで高精度な計測を実現する移動式水圧構成装置を開発することで、現場での比較校正作業を実現した（Machida et al., 2019）。さらに現場における校正時にはDONET水圧計との水準差を計測することができ、その水頭差を把握することでDONET水圧計に対して絶対圧力を値付けすることができる。これまでDONET1, DONET2においてそれぞれ1観測点ずつ（MRC10, KMB08）のDONET水圧計の校正を重点的に繰り返し行ってきた。

校正の結果、DONET2海域に設置されたMRC10観測点では1.9cm/year（ $\pm 0.6$  cm）の沈降、DONET1海域に設置されたKMB08観測点では1.2cm/yearの沈降を示した（1hPa = 1 cm）。南海トラフにおいては海上保安庁によるGNSS-A観測により海底地殻変動が繰り返し行われてきており（Yokota et al., 2018）、その中でMRC10観測点、KMB08観測点に近傍なSIOW観測点、KUM3観測点における長期地殻変動成分を比較したところ、KMB08観測点では整合的な変動成分が示された一方で、MRC10観測点においては水圧計による変動成分がやや大きく見られている。より定量的な沈降速度を評価するためには、沈降速度の短期的な変化の可能性や、DONET水圧計が測器の初期ドリフトのような影響を含んでいる可能性があるなど、より慎重な検討が必要である。

## Shallow slow slip and associated VLFE activity observed by seafloor fiber optic strainmeter in the Nankai Trough.

\*Eiichiro ARAKI<sup>1</sup>, Takashi Yokobiki<sup>1</sup>, Satoru Baba<sup>1</sup>, Yojiro Yamamoto<sup>1</sup>, Mark Zumberge<sup>2</sup>, Shuhei Nishida<sup>1</sup>, Yuya Machida<sup>1</sup>, Hiroyuki Matsumoto<sup>1</sup>

1. JAMSTEC Institute for Marine Geodynamics, 2. Scripps Institution of Oceanography

南海トラフでのプレート沈み込み境界域の浅部では、繰り返しゆっくり滑りが発生することが掘削孔内の観測で明らかにされている(Araki et al., 2017). 広域でのゆっくり滑りの時空間的発生を検討するために、これまでの掘削孔の観測網の西側の南海地震震源域の沖合の、ゆっくり滑りの発生が想定される地域の近傍で海底ケーブル観測網 (DONET) に接続することで長期間連続観測が行える海底光ファイバー歪計(Zumberge et al., 2018)を開発し、観測を行ってきた。2022年1月12日~2月5日にかけて、海底光ファイバー歪計の観測データはゆっくりとした変化を示し、3週間ほどかけて $0.7\mu$ 歪程度伸長を示した。また、この期間近傍で超低周波地震(VLFE)が観測されており、光ファイバー歪計の接続されているDONET-2Fノード近傍およびDONET-2Gノード近傍で活発なVLFE活動がみられた。さらに光ファイバー歪計では、近傍のDONET-2Fノード付近で発生したVLFEの多くについて、歪観測記録にゆっくりとしたステップ状の変化を観測した。うち、例えばDONETで地震波形インバージョンにより決定されたMw 4.4のVLFEについて光ファイバー歪計によって観測された海底面歪変化量は20n strain程度であった。これは、微小な変化ではあるが、VLFEの断層運動に伴う海底面変動を観測出来ているものと考えられる。また、観測されたVLFEにともなう歪変化は、VLFEの位置・メカニズムと光ファイバー歪計の位置によく関連した極性と推移を示しており、VLFEの断層近傍での歪計測によって、個別の超低周波地震における断層の滑り過程を議論することが可能であると考えられる。一方、3週間の間に観測されたゆっくりとした変化量は、これらのVLFEでの断層運動で説明することは困難であった。従って、観測されたゆっくりとした歪変動は、VLFEがみられたDONET-2Fおよび2Gの広域を跨ぐ可能性のある浅部ゆっくり滑りであって、その滑りによって個別のVLFE断層をローディングし浅部ゆっくり滑りと同時期のVLFEのバースト的なクラスターとなったのではないか。VLFEの活動期間は観測された浅部ゆっくり滑りより少し遅れていることも、このようなVLFEの発生メカニズムをサポートするものとする。

## Sentinel-1 SAR observation at the northern Noto peninsula associated with active scismicity since the end of 2020

\*Yohei Kinoshita<sup>1</sup>

1. University of Tsukuba

2020年末頃より、能登半島北部の珠洲市近郊にて地震活動の活発化が確認されている。また、地震活動の活発化と同時期より、国土地理院のGNSS連続観測網GEONETによって地震発生域周辺の観測点で局所的な地表面変位が始まったことが報告されている。西村ほか（2022, 日本地球惑星科学連合大会）はこれらGEONET観測データに加え臨時GNSS観測データを解析し、球状圧力源の膨張により地表面変位を説明できるとしている。しかしながら、GNSS観測は検出精度および時間分解能に優れているものの空間分解能は観測点密度に依存しており、本事例における地表面変位の空間的な詳細は明らかではない。本研究では高空間分解能に地表面変位を検出可能なSAR時系列解析を実施し、能登半島北部での地表面変位の空間的な詳細を明らかにするとともに、その結果に基づいて地表面変位の変動源について推定も行なったので、それら結果を報告する。

SAR時系列解析には、C-バンドSARのSentinel-1データを用い、ISCE ver.2ソフトウェアにより干渉解析を実施、得られたSAR干渉画像から時系列解析ソフトウェアLiCSBASにより面的地表面変位の時系列を推定した。C-バンドSARは植生等の影響による干渉性の低下が著しいため、マルチルッキング処理およびスペクトルフィルターを適用して干渉性を向上させている。上記SAR時系列解析を2つの異なる観測方向データに適用することで、2方向について地表面変位速度を求めた。なおSAR時系列解析で用いたSentinel-1Aおよび1BのうちSentinel-1Bについては2021年12月の観測を最後にセンサートラブルにより観測が停止しているため、本研究では2つの観測方向情報が利用可能な2021年12月までのSARデータで時系列解析を実施した。地表面変位画像を解釈しやすくするため、SAR時系列解析で得られた推定変位速度は2.5次元解析により準東西成分と準上下成分に投影した。SAR時系列解析で得られた変位速度の妥当性を検証するため、GEONETのF5解日座標値データを用いた。その際、変位の基準点として珠洲市より西方に位置し本事例による地殻変動の直接的影響が無いとみられる穴水（020972）を設定した。地表面変位の変動源推定には、Fukuda and Johnson（2008, GJI）のFully Bayesian Inversionを用い、SAR時系列解析の変位速度およびGEONETの変位速度を入力としたJoint inversionを実施した。変動源の候補として、本研究では反無限弾性体矩形断層モデルおよび球状圧力源モデルの2つを用いた。

SAR時系列解析および2.5次元解析の結果、珠洲市近郊で顕著な隆起およびその周辺で東西方向に拡大するパターンの変位空間分布が得られた。衛星SAR観測は南北方向の変位に感度が無いものの、東西方向および鉛直方向の推定変位速度については、GEONETで得られた変位速度と時間・空間ともに調和的なパターンが得られている。このSAR変位速度とGNSSの変位速度に対しInversion解析を実施した結果、矩形断層モデルと球状圧力源モデルのいずれでも同程度に地表面変位を説明できるモデルパラメータが推定された。観測変位とモデル変位のRMSEを比較したところ、球状圧力源モデルの方がわずかに良い結果が得られ、西村ほか（2022）の結果を支持する結果となった。ただし矩形断層モデルと球状圧力源モデルのいずれにおいても、SAR変位速度に対して4, 5mm程度のRMSE推定残差が見られていること、またGNSS観測点能都（960574）での1cm程度の南向きの変位を全く説明できていないことから、単一の矩形断層および単一の球状圧力源のみでは、InSAR観測とGNSS観測の両方を十分に説明することはできていないことが示唆される。

本研究はJSPS科研費JP22K19949の助成を受けたものです。

**Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity**

📅 Tue. Oct 25, 2022 5:00 PM - 5:45 PM JST | Tue. Oct 25, 2022 8:00 AM - 8:45 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S03] PM-3**

chairperson: Yuya Machida(JAMSTEC), Yohei Kinoshita(University of Tsukuba)

5:00 PM - 5:15 PM JST | 8:00 AM - 8:15 AM UTC

[S03-05] Dense GNSS observations around strain-rate concentration zones – Detailed velocity distribution in the San-in shear zone and Arima-Takatsuki fault zone

\*Takuya NISHIMURA<sup>1</sup> (1. Kyoto University)

---

5:15 PM - 5:30 PM JST | 8:15 AM - 8:30 AM UTC

[S03-06] Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and its application to gravity Bayesian inversion

\*Yuanyuan Niu<sup>1</sup>, Jiancang Zhuang<sup>2,1</sup> (1. SOKENDAI, 2. ISM)

---

5:30 PM - 5:45 PM JST | 8:30 AM - 8:45 AM UTC

[S03-07] Strain and barometric pressure observations of the 2022 Hunga-Tonga eruption with a laser strainmeter at Kamioka

\*Akiteru TAKAMORI<sup>1</sup>, Akito ARAYA<sup>1</sup>, Kouseki MIYO<sup>2</sup>, Tatsuki WASHIMI<sup>3</sup>, Takaaki YOKOZAWA<sup>2</sup>, Hideaki HAYAKAWA<sup>2</sup>, Masatake OHASHI<sup>2</sup> (1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 3. National Astronomical Observatory of Japan)

# Dense GNSS observations around strain-rate concentration zones –Detailed velocity distribution in the San-in shear zone and Arima-Takatsuki fault zone

\*Takuya NISHIMURA<sup>1</sup>

1. Kyoto University

## 1. はじめに

日本列島で国土地理院によるGNSS連続観測網（GEONET）が構築され、地震間の変形速度分布が明らかになってから30年近くが経過した。この間、特に歪み速度が大きい「ひずみ集中帯」と呼ばれる地帯が日本各地に発見されており（例えば、Sagiya et al. 2000; Nishimura and Takada, 2014）、内陸地震の多発帯と一致することから注目されている、しかし、GEONETの平均観測点間隔は20km程度であり、ひずみ集中帯の詳細な分布や活断層との対応関係を詳細に検討することやひずみ集中のメカニズムの解明には十分とは言えない。そのため、観測点間隔を数km程度とするような稠密GNSS観測がひずみ集中帯の各地域で行われてきた（例えば、Sagiya et al., 2002）。新潟-神戸ひずみ集中帯の最西部に位置する大阪府北部の有馬-高槻断層帯は、地質学的な平均変位速度が1.5mm/年に達する右横ずれ断層である。GEONETデータに基づく測地学的平均変位速度より、この断層帯の深部で10mm/年程度のすべり速度が推定されている（Nishimura et al., 2018）。周辺で2018年に大阪府北部地震(M6.1)が発生したことを契機として、断層帯に直交方向のアレイを主とした11点の新規連続観測点を2019年8月に設置した。一方、山陰ひずみ集中帯の最西部に位置する島根県西部三瓶山周辺では、西北西-東南東走向のひずみ集中帯とは概ね直交する北北西-南南東走向の地震群が見られ、2018年にも同じ走向の地震（M6.1）が発生するなど興味深い地域である。この地域においては、地震分布とひずみ速度分布の対応関係を調べるために、9点の新規観測点を2020年7月に設置した。これらの観測点の設置から2年以上が経過し、データが蓄積したことで、高精度の変位速度を算出できるようになった。本発表では、有馬-高槻断層帯周辺及び三瓶山周辺でのGNSSデータを解析し、変位速度及びひずみ速度分布と簡単なモデル化を行なった結果について報告する。

## 2. データ及び解析方法

日座標値の計算には、GipsyX Ver 1.4によるバイアス整数化精密単独測位法を用いた。米国ジェット推進研究所（JPL）が提供している精密歴及び座標変換パラメータを用いてITRF2014準拠(IGS14)の座標値を得た。得られた座標値に線形・年周・半年周からなる関数をフィッティングし、約3年間の平均速度を最小二乗法で求めた。ひずみ速度の計算には、ABICを用いた3次Bスプラインの基底関数展開によって表された変位分布を空間微分するOkazaki et al.(2021)の手法を用いた。

## 3. 結果

有馬-高槻断層帯周辺の速度場からは、断層に平行な速度成分が断層帯を挟んでarctan型の変位分布が明瞭に認識され（図）、2次元の鉛直横ずれ断層の深部すべりモデル（Savage and Burford, 1973）を用いると、深部すべり速度は約9mm/年、固着域の深さは12kmと推定された。すなわち、数年程度の測地学的時間スケールでは、地質学的時間スケールよりもはるかに速く断層深部がすべっていることが確かめられた。一方、三瓶山周辺の速度場からは、顕著なひずみ集中域は見られず、陸域にひずみ集中域が観測されている鳥取県側（Meneses-Gutierrez and Nishimura, 2020）とは異なり、ひずみ集中域が海域にあることが示唆される。

謝辞：GNSS観測点の設置にあたり自治体の関係者には大変お世話になりました。国土地理院GEONET及び京都市埋蔵文化財研究所のGNSSデータを使用しました。後者のデータ提供にあたっては、宮原健吾様にご尽力いただきました。ここに記して感謝いたします。

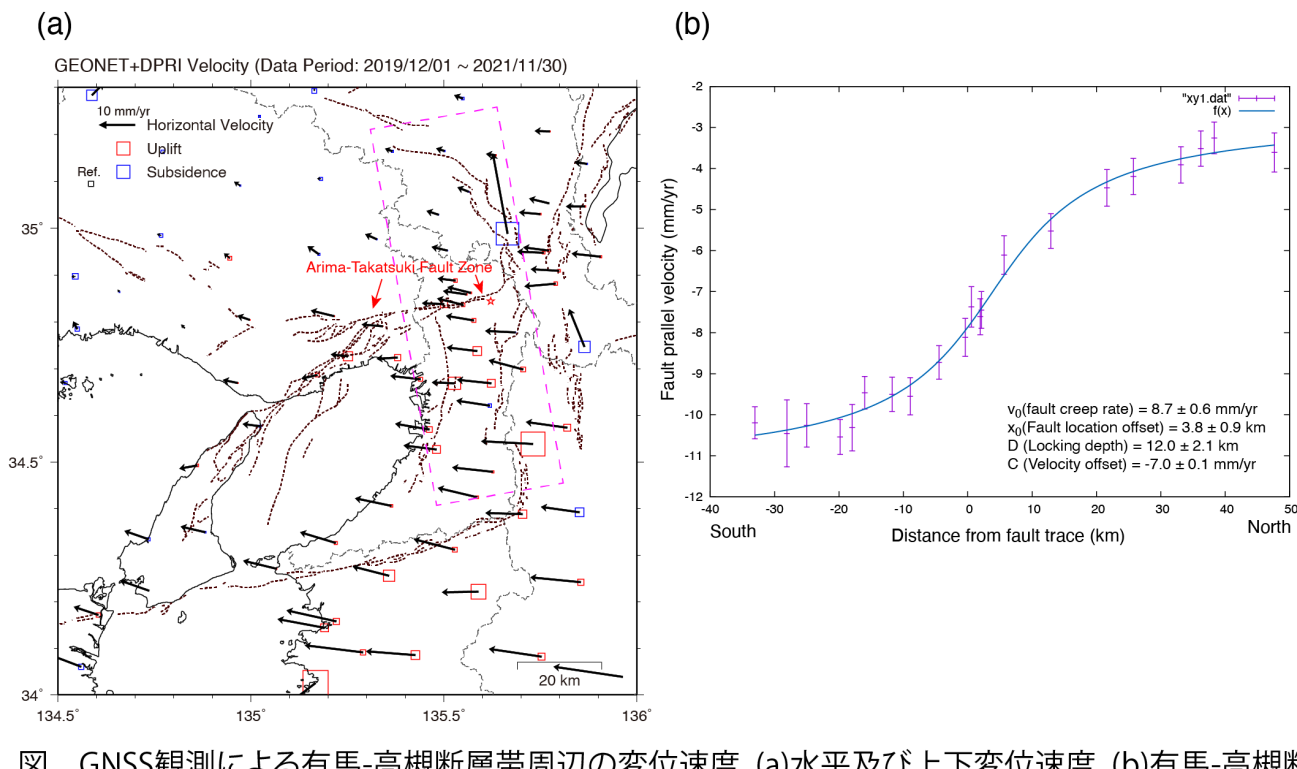


図 GNSS観測による有馬-高槻断層帯周辺の変位速度. (a)水平及び上下変位速度. (b)有馬-高槻断層帯に平行な速度成分. 青のカーブは, 鉛直右横ずれ断層の深部すべり(Savage and Burford, 1973)を仮定してフィティングした速度分布. (a)のピンクの矩形領域の観測点を使用.

## Second-order smoothness prior over the Delaunay Tessellation and its application to gravity Bayesian inversion

\*Yuanyuan Niu<sup>1</sup>, Jiancang Zhuang<sup>2,1</sup>

1. SOKENDAI, 2. ISM

Prior information is always used to add constraints in Bayesian geophysical inversions to solve the non-uniqueness problem of the solution. A commonly used constraint is on the smoothness (second-order derivative) of the model parameters. The smoothness is usually calculated through interpolation over regular grids for the reason of easy implementation in numerical calculations. When observed data are irregularly distributed such as in geodetic data, interpolation based on a Delaunay tessellation (DT) over the observation locations is popularly used to avoid additional interpolations and to maintain the flexibility in the resolution of the model solution. However, calculating the smoothness of a function based on DT-based interpolation is more difficult than calculating the flatness (first-order derivative). We propose two interpolation methods for calculating the smoothness with DT-based interpolators: the double linear and the quadratic interpolators. These two methods are tested through numerical experiments. We also apply the DT-based interpolation methods to a gravity Bayesian inversion problem, in which the Bouguer gravity anomaly and the near-surface density structure are estimated.

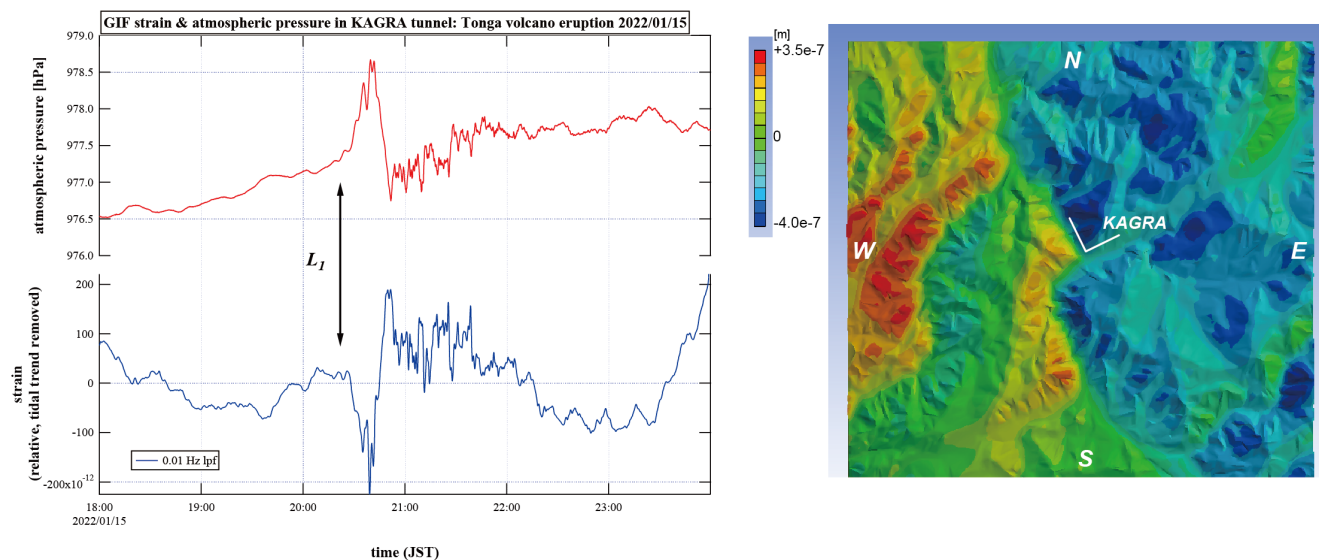
## Strain and barometric pressure observations of the 2022 Hunga-Tonga eruption with a laser strainmeter at Kamioka

\*Akiteru TAKAMORI<sup>1</sup>, Akito ARAYA<sup>1</sup>, Kouseki MIYO<sup>2</sup>, Tatsuki WASHIMI<sup>3</sup>, Takaaki YOKOZAWA<sup>2</sup>, Hideaki HAYAKAWA<sup>2</sup>, Masatake OHASHI<sup>2</sup>

1. Earthquake Research Institute, University of Tokyo, 2. Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, 3. National Astronomical Observatory of Japan

我々は岐阜県飛騨市神岡町の重力波望遠鏡KAGRAのトンネル内に基線長1500 mのレーザー伸縮計（Geophysics Interferometer: GIF）を設置して2016年よりひずみ観測を行っている（Araya et al. 2017）。周波数安定化レーザーを用いることにより、GIFでは1 Hz以下の帯域で $10^{-12}$ 台のひずみ分解能を定常的に実現しており、これまでに潮汐や地震に伴うひずみステップなどの現象を観測してきた。また、0.1 – 1 mHzの周波数帯域では坑内の気圧とGIFのひずみスペクトルの形に高い類似性がみられた。そこで、両者の比例関係を仮定してひずみ観測値から気圧の寄与を差し引く補正を試みたところ、その効果は最も良い場合でも約1/3倍にとどまった。この結果は、ひずみが局所的な気圧変化だけで決まるのではなく、より広域の気圧変動の影響を受けていることを示唆していると考えられる（Akutsu et al. 2021）。

2022年1月15日のフンガ・トンガ海底火山の大規模噴火は、津波や電磁場の擾乱をはじめ地球規模で様々な影響を及ぼした。噴火によって発生した大気Lamb波が地球を周回する様子は気圧や潮位の変動として各地で観測された。KAGRAサイトでもLamb波による気圧変動やインフラサウンド等が捉えられ、GIFでは気圧に伴うひずみの変化を明瞭に観測することができた。また、気圧変化とひずみには負の相関がみられ、その係数はおよそ $-(2-3) \times 10^{-10}$  /hPaであった。本講演では、このイベントの観測結果を紹介するとともに、気圧の影響を定量的に分析するために作成した有限要素モデルによる解析等について報告する。ひずみ計設置点だけでなく、周辺領域に加わる気圧の影響を含むモデルは、将来的には先に述べた広域の気圧変化とひずみの関係の理解に役立つものと期待できる。



左図：KAGRA 坑内で観測された、フンガ・トンガ噴火によって発生した大気 Lamb 波による気圧変化（上）と GIF によるひずみ観測結果（下）

右図：有限要素モデルにより求められた、1 hPa の気圧変化に対する KAGRA 周辺の地表の東西方向の変位（西方向を正とする）

## Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity

📅 Wed. Oct 26, 2022 9:45 AM - 10:45 AM JST | Wed. Oct 26, 2022 12:45 AM - 1:45 AM UTC | 🏢 ROOM C  
8th floor (Training Room 820)

**[S03] AM-1**

chairperson: Yutaro Okada (Kyoto University), Yuto Nakamura (Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

9:45 AM - 10:00 AM JST | 12:45 AM - 1:00 AM UTC

[S03-08] Positioning accuracy evaluation of GNSS-A analysis software GARPOS using numerical simulation

\*Yuto NAKAMURA<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup> (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

10:00 AM - 10:15 AM JST | 1:00 AM - 1:15 AM UTC

[S03-09] Examination of new method of acoustic signal detection in SGO-A

\*Koya Nagae<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup>, Yuto Nakamura<sup>1</sup> (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo)

10:15 AM - 10:30 AM JST | 1:15 AM - 1:30 AM UTC

[S03-10] Acoustic signal angle/device dependences and up-down component error in SGO-A

\*Yusuke YOKOTA<sup>1</sup>, Koya Nagae<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>2</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>2</sup>, Yuto Nakamura<sup>2</sup> (1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

10:30 AM - 10:45 AM JST | 1:30 AM - 1:45 AM UTC

[S03-11] Lack of inter-plate coupling at the southwestern end of the Ryukyu Trench observed by GNSS/Acoustic geodesy

\*Ryosuke Nakahata<sup>1</sup>, Ryoya Ikuta<sup>1</sup>, Akihiro Nagaya<sup>2</sup>, Keiichi Tadokoro<sup>3</sup>, Mamoru Nakamura<sup>4</sup>, Rumi Sohrin<sup>1</sup>, Yasushi Harada<sup>5</sup>, Masataka Ando<sup>1</sup> (1. Shizuoka University, 2. Kobe University, 3. Nagoya University, 4. University of the Ryukyus, 5. Tokai University)

## Positioning accuracy evaluation of GNSS-A analysis software GARPOS using numerical simulation

\*Yuto NAKAMURA<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup>

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

GNSS観測と海中音響測距を結合することにより海底の動きをセンチメートル単位で検出するGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）の測位精度は、海中音速場の擾乱の影響を大きく受ける。そのため、海底測位の分野では海中音速場と海底局位置を観測データから適切に推定するための様々な解析手法が開発されてきた。海中音速場と海底局位置を経験ベイズにより同時推定するGNSS-Aデータ解析ソフトウェア「GARPOS」（Watanabe et al. 2020, FES）では海中音速場を水平成層の基準場と、海上局及び海底局位置に依存する水平傾斜パラメータに分解し推定している。中村ほか（2021, 地震学会）では数値シミュレーションを用いてGARPOSの水平傾斜パラメータの解釈について議論したが、水平傾斜場が測位解の精度にどの程度影響を及ぼすかについてより詳しく検証する必要がある。

本研究では、PythonのEikonal方程式レポジトリ「PyKonal」（White et al. 2020, SRL）を用いた数値シミュレータで作成したGNSS-A疑似データにより、「GARPOS」の測位精度の評価を行った。数値シミュレータでは、直交座標系のグリッドに海中音速場を与え、最上部のグリッド（海面）からグリッド底面（海底）に設定した海底局位置の間の三次元的な音響伝播を計算する。PyKonalは離散化されたEikonal方程式を低い計算コストで解くFast Marching Method（Sethian 1999, SIAM Rev）を実装しており、Snellの法則を用いたレイトラッキングよりも厳密な理論音響走時を計算できる。計算した理論音響走時と送受信グリッドの座標を結合することにより作成したGNSS-A疑似データをGARPOSで解析し、解析結果をシミュレーションの設定条件と比較することで、GARPOSの測位精度を検証した。

数値実験では、様々な強度・厚さ・深度の水平音速傾斜場を与えてシミュレーションを行った。各パラメータがGARPOSの測位解にどのような影響を与えるか調べ、水平傾斜場が存在する海中音速場における測位解の系統的な誤差について議論する。

## Examination of new method of acoustic signal detection in SGO-A

\*Koya Nagae<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>1</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>1</sup>, Yuto Nakamura<sup>1</sup>

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, University of Tokyo

GNSSと音響測距を組み合わせることで海底地殻変動をセンチメートルレベルでとらえる手法を、GNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）と呼ぶ。海上保安庁では、この手法を用いた海底地殻変動観測網SGO-Aを展開しており、これまで、2011年の東北地方太平洋沖地震による地殻変動やその後の粘弾性緩和、プレート間固着や浅部スロースリップ(SSE)などの固体地球科学における重要な結果を示した。現在は、GARPOS（Watanabe et al., 2020, FES）と呼ばれる解析ソフトウェアによりSGO-Aの測位解が公表されている。SGO-Aでの測距には、海上局と海底局の間を10kHzの正弦波を搬送波とする音響信号が用いられる。海上局が受信した波形と送信波形との相関処理を行い、信号の送受時刻を精密に決定することで、往復走時を算出している（富山, 2003, 海洋情報部技報）。ここで、往復走時の分解能は、搬送波の1波長である0.1 msec（往復距離に換算すると約7.5 cm）である。しかし、GARPOSによるこれまでの測位解析では、往復走時残差の標準偏差  $\sigma$  が0.1 msec以上である結果が多く、観測エポックで得られている。さらに、多くの観測エポックで水平方向の測位解のばらつきよりも上下方向のばらつきの方が明らかに大きく、GNSS-A観測での上下方向の位置の不確実性が指摘されてきている。このような上下方向の解のばらつきは、SGO-A観測網が整備され始めて20年以上が経過し、海上局や海底局を更新する機会が増えたことによる機器の変化が原因の一つとして挙げられる（横田ほか, 2022, 地震学会）。このような機器依存により受信信号に変化（図1）が生じ、読み取り位置に誤りが生じたと考えられる。なお、この図1に示した2エポック間では使用した海底局が異なっている。従来の受信波形の読み取りは、まず、図1の中段に示した相関波形の最大値を見つけ、その値の0.4倍を初めて超す極大値を読み取り値として採用している。図より、2012年と2021年では、中段の相関波形の形状が大きく異なり、特に2021年の波形は後ろへ伸びて波形の最大値が不明瞭であり、結果的に読み取りの精度が悪化したと考えられる。そこで本発表では、SGO-Aにおける全期間にわたって統一的利用可能な新しい受信信号の読み取り方法を検討する。新しい手法では、まず下段の相関波形に対して立ち上がり位置を決定する。なおこの立ち上がり位置は、エポックごとに決定される閾値  $s$  を初めて上回った極大値と定義する。次に、立ち上がり位置から  $N$  個目の極大値を読み取り位置とする。ここで、閾値  $s$  や  $N$  は、GARPOSにより得られる走時残差が小さくなるように決定する。この手法を用いることで波形の重畳の影響を抑えることができ、往復走時残差の  $\sigma$  を2 - 2.5 cm程度の精度が可能となる見通しであるが、将来的には、さらに高度で正しい読み取りが実現することが期待される。

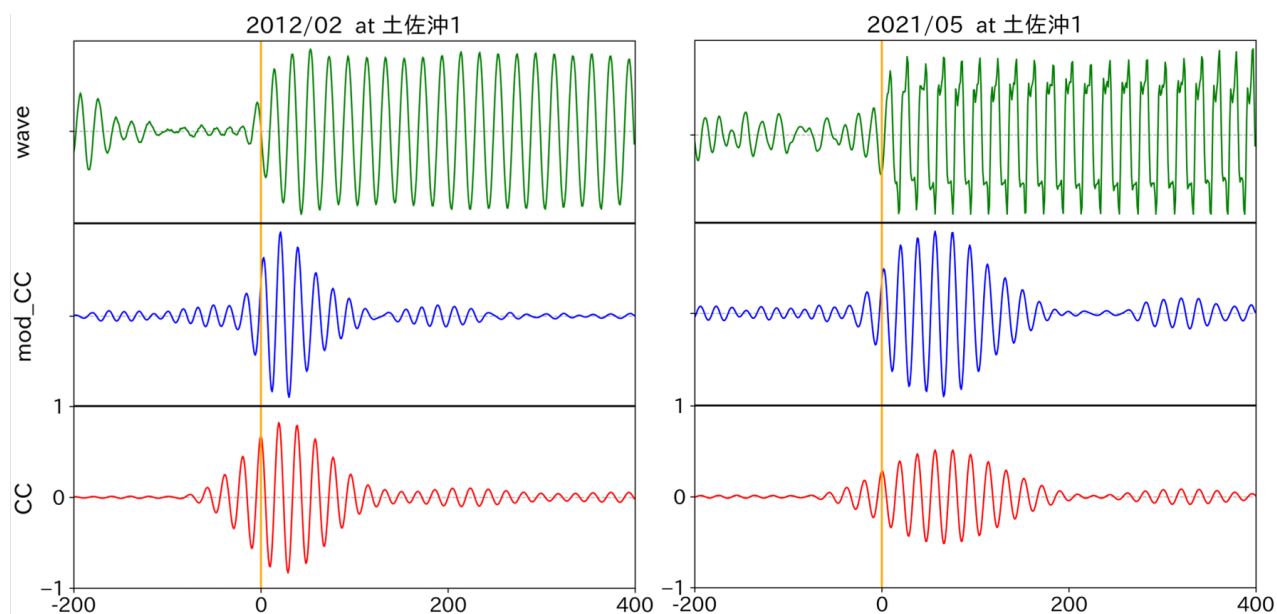


図 1 : 2012年 (左) と 2021年 (右) における受信波形や相関関数の変化.  
上段 : 受信波形. 中段 : 受信波形と変形参照波形 (富山, 2003, 海洋情報部技報) の相関関数.  
下段 : 受信波形と参照波形の相関関数.

## Acoustic signal angle/device dependences and up-down component error in SGO-A

\*Yusuke YOKOTA<sup>1</sup>, Koya Nagae<sup>2</sup>, Tadashi Ishikawa<sup>2</sup>, Shun-ichi Watanabe<sup>2</sup>, Yuto Nakamura<sup>2</sup>

1. Institute of Industrial Science, University of Tokyo, 2. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard

海上保安庁はGNSS-音響測距結合方式（GNSS-A）による海底地殻変動観測を継続的に実施している。この観測網をSGO-Aと呼ぶ。現在、GARPOS（Watanabe et al., 2020, FES）と呼ばれる解析手法による結果が公表されている。船舶側の海上局と海底局の間は10kHzの正弦波で構成される音響信号によって測距される(富山, 2003, 海洋情報部技報)。送信信号と受信信号に対してそれぞれ理論波形との相関処理を行うことで信号の送受時刻を精密に決定して往復走時を計測する。

これまでのデータから水平動よりも大きい上下動のばらつきは、(i)音響信号の読み取り誤り(永江ほか, 2022, 地震学会)にくわえて、次の2つの要因による音響往復時間の計測誤りに依存していることがわかってきた。

(ii)ソナーの有限の大きさに依存した信号の位相反転、重畳などによる角度依存性

(iii)海上局、海底局や観測時期などの機器に依存した位相、タイミングの崩れ具合の違い

これら(ii)と(iii)の影響は見かけの受信波形・相関波形からは容易に識別することができない場合が多いが、GARPOSの最終残差に0.1msec (信号1波長分) ほどのばらつきが見られることで認識される。

音響信号の角度依存性はHonsho et al. (2021, FES)で東北大の観測で用いられる7次2波のM系列信号に対して指摘されており、SGO-Aで用いられている9次4波のM系列信号でも生じていることが確認されたものである。(ii)の角度依存性には(iii)で指摘される機器依存性も関係している。海上局と海底局の機器の組み合わせが変更された場合に角度依存性の表出の仕方が変化する。これらの複合的な影響による信号相関波形の違いに応じた読み取り閾値を考慮しなければ1波長（0.1msec）以上の読み取り誤りを生み、とくに上下動の推定に悪影響がある。

既に広く研究されているGNSS観測における誤差は、①大気圏・電離圏遅延量などの自然由来誤差(Davis et al., 1985, RS; Boehm et al., 2006, JGR)と②サイクルスリップなどの非自然由来誤差(Lau & Cross, 2007, JG), ③アンテナ補正量・マルチパスなどの衛星角度に依存した誤差(Kunysz, 2010, IEEE; Banville & Langley, 2013, JG)に分けられる。GNSS-A観測における海中音速度場による誤差(Yokota et al., 2019, MGR)は①のアナロジーであり、(i)信号の読み取り誤差は②、(ii)角度依存誤差と(iii)機器依存誤差は③（②を含む場合もある）のアナロジーであると考えられる。

本発表では、GARPOSによる推定結果を利用することで、全期間に統一的に利用できる信号トラベルタイムの補正法を考察し、SGO-A観測網のより正しい上下動を導出する方法を議論する。この中で、(iii)を適切に補正することで最も懸念される海底局置き換えなどによる10cm近いバイアス的なずれはほぼ補正可能であることがわかった。ただし、(iii)の物理的な原因は不明であり、今後、水槽実験などで調査する必要がある。

(ii)はGARPOSの最終残差に対する移動平均などによるスムージング結果を用いることで補正することは可能であり、残差のばらつきを抑えるだけでなく、一部の観測エポックの上下動誤差の低減に効果を示すことがわかった。こちらも詳細な原因は不明であるが、以前から実験的に指摘されており(望月ほか, 2007, 海洋情報部研究報告)、今後、水槽実験などで調査する必要がある。

これまでの考察から、 $\sigma \sim 2\text{--}2.5\text{cm}$ 程度の精度は実現できる見通しであるが、将来的にはさらに高度で尤もらしいトラベルタイム補正が実現することで精度を上げることができると考えられる。

謝辞：本研究は東京大学地震研究所の公募研究ERI JURP 2022-Y-KOBO25により実施されています。

## Lack of inter-plate coupling at the southwestern end of the Ryukyu Trench observed by GNSS/Acoustic geodesy

\*Ryosuke Nakahata<sup>1</sup>, Ryoya Ikuta<sup>1</sup>, Akihiro Nagaya<sup>2</sup>, Keiichi Tadokoro<sup>3</sup>, Mamoru Nakamura<sup>4</sup>, Rumi Sohrin<sup>1</sup>, Yasushi Harada<sup>5</sup>, Masataka Ando<sup>1</sup>

1. Shizuoka University, 2. Kobe University, 3. Nagoya University, 4. University of the Ryukyus, 5. Tokai University

琉球海溝の南西端に位置する八重山諸島は、1771年4月24日に発生した「八重山津波」と呼ばれる巨大津波によって壊滅的な被害を受けたことが知られている。八重山津波の発生源は未だ議論が続いているが、Nakamura (2009)は、琉球海溝南西端のプレート境界浅部で発生したMw8.0の津波地震が発生源であることを示唆している。そこで我々は、琉球海溝南西端のプレート境界の固着の有無を明らかにするために、2014年10月に波照間島南方沖約40km、水深約3300mの前弧海盆に海底基準局OHTM (図)を設置した。海底基準局は3台のトランスポンダをおおむね水深の1/√2程度の外接円直径をもつ正三角形に配置した。2014年10月から2022年6月まで、2021年を除いて年一回のGNSS/音響測距結合方式による観測を実施し、海底局の座標の変動から固着の有無を推定した。本発表では、すでに解析が済んでいる2014年10月～2020年9月の結果に、現在解析中の2022年の結果を併せて報告する予定である。

海底局の座標は、解析プログラム群OCDASAN (Ocean-bottom Crustal Deformation Analysis tool for Study in Ando labo. Nagoya university) を用いてIkuta et al. (2008)によって提案された方法で推定した。本研究では、3台のトランスポンダの重心を海底局の座標と定義している。OCDASANは、(1) 海中の音速構造は水平成層をなしており、一定の滑らかさで時間変化する、(2) 3台のトランスポンダの構成は不変、という2つの仮定のもと罰則付き最小二乗法を解くことにより海底局の座標を推定している。

解析の結果、2014年10月～2020年9月のOHTM海底局の移動方向及び移動速度は、揚子江プレートに対して南向きに $66.3 \pm 10.3$ mm/yr、東向きに $19.0 \pm 9.4$ mm/yrと推定された。また、上下方向は $0.0 \pm 9.7$ mm/yrと推定され、上下変動を伴っていないといえる。さらに、この海底局の移動速度は、西表島及び波照間島に設置されている国土地理院の陸上GNSS局で観測された移動速度よりも速い。この結果は、この地域のプレート境界には固着が存在せず、それどころか前弧海盆が上下変動を伴わずに伸長していることを示唆している。

上下変動を伴わずに前弧海盆を伸長させるメカニズムとして、Nagaya et al. (2016)で提案された、琉球海溝のマントルウェッジの先端におけるアンチゴライトの弱い対流が考えられる。アンチゴライトはマントル中のかんらん岩が水和してできる蛇紋岩の一種であり、かんらん岩よりも粘性率が低いのが特徴である。海底局を設置した前弧海盆の地下の比較的浅部にまで、水和してアンチゴライト化したマントルウェッジかんらん岩が侵入し、対流によって前弧ウェッジを海溝側に引き伸ばしていると考えられる。さらに我々は、FreeCAD 0.19 (<https://www.freecadweb.org/?lang=ja>)を用いて、有限要素法を用いて我々の観測結果を再現するモデルを検討した。OHTM直下のプレート境界に固着が無いだけでは不足、マントルウェッジの先端にウェッジを伸長させる対流が必要であることが示唆された。

本研究の結果は琉球海溝南西端の前弧下に固着が無いことを示しているが、固着の欠損がどの程度広範囲にわたるかを知るには更に海溝に沿って広範囲で海底地殻変動を観測する必要がある。OHTM観測点直下に固着が無い事実は、八重山津波の発生源としてOkamura et al. (2018)のような海溝斜面における海底地すべりが有力な候補であることを支持する。1771年の八重山津波では八重山諸島で強震動があったことが示唆されている (例えばAndo et al. 2018) が、直下型の地震に伴う海底地すべりであったと考えても矛盾はない。将来、海底地すべりにより八重山津波の規模の津波が強震動を伴わずに生じる可能性も考えられる。減災のためには海盆上に海底津波計などを設置し、発生した津波を直接監視するシステムが有効である。

今後の計画として、波照間島沖の海底地殻変動観測を続けるほか、宮古島南方沖の宮古深海平坦面に新たな海底局を設置し、この地域のMw8.0クラスのプレート境界地震を発生させうる固着の有無を明らかにしていく予定である。

#### 引用文献

Ando, M., Kitamura, A., Tu, Y., Ohashi, Y., Imai, T., Nakamura, M., Ikuta, R., Miyairi, Y., Yokoyama, Y., and Shishikura, M., 2018, Source of high tsunamis along the southernmost Ryukyu trench inferred from tsunami stratigraphy. *Tectonophysics*, **722**, 265 -276. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.11.007>

Ikuta, R., Tadokoro, K., Ando, M., Okuda, T., Sugimoto, S., Takatani, K., Yada, K., and Besana G.M. 2008, A new GPS-acoustic method for measuring ocean floor crustal deformation: Application to the Nankai Trough. *Journal of Geophysical Research Solid Earth*, **113**, B02401. <https://doi.org/10.1029/2006JB004875>

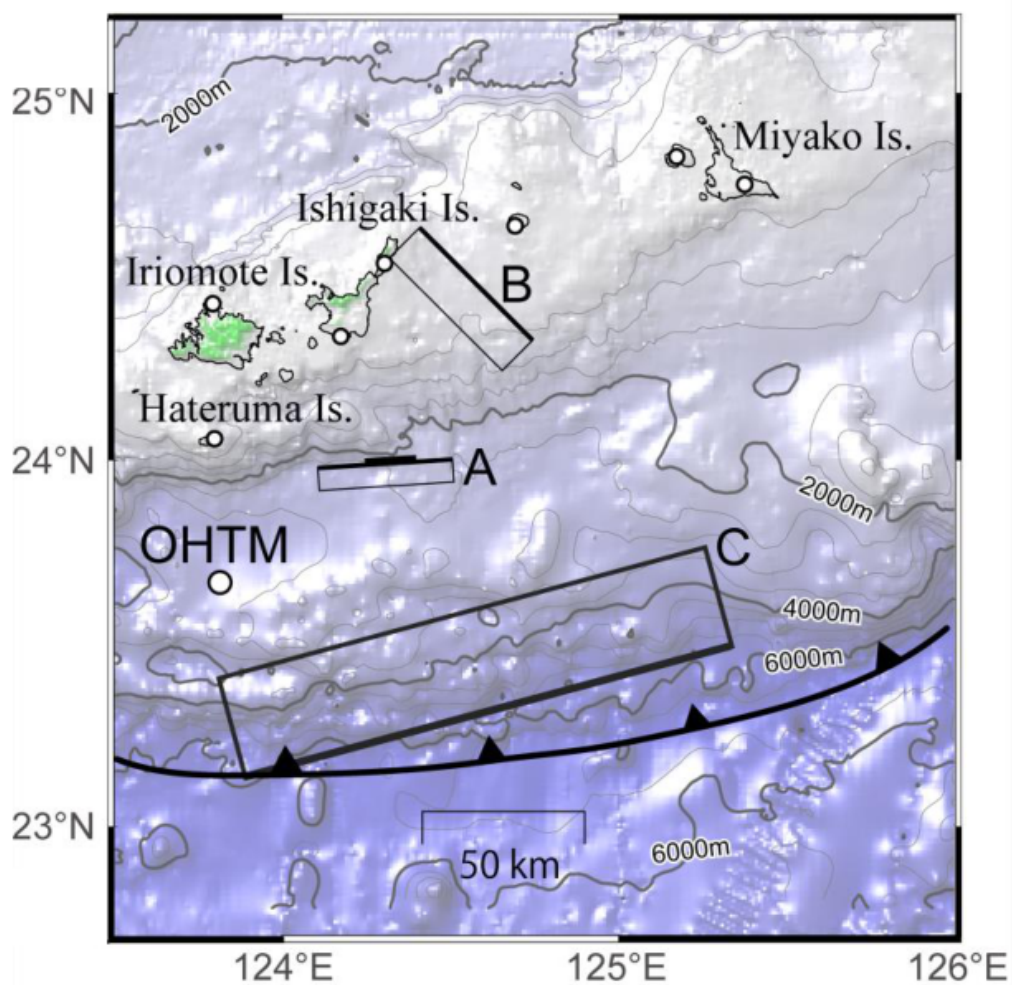
Imamura, F., Yoshida, Y., & Moore, A., 2001, Numerical study of the 1771 Meiwa tsunami at Ishigaki Island, Okinawa and the movement of the tsunami stones. *Proceedings of Coastal Engineering, JSCE*, **48**, 346-350 (in Japanese). <https://doi.org/10.2208/proce1989.48.346>

Nakamura, M., 2006, Source Fault Model of the 1771 Yaeyama Tsunami, Southern Ryukyu Islands, Japan, Inferred from Numerical Simulation. *Pure and Applied Geophysics*, **163**, 41-54. <https://doi.org/10.1007/s00024-005-0007-9>

Nakamura, M., 2009, Fault model of the 1771 Yaeyama earthquake along the Ryukyu Trench estimated from the devastating tsunami. *Geophysical Research Letters*, **36**, L19307. <https://doi.org/10.1029/2009GL039730>

Nagaya, T., Walker, A.M., Wookey, J., Wallis, S.R., Ishii, K., and Kendall, J.M., 2016, Seismic evidence for flow in the hydrated mantle wedge of the Ryukyu subduction zone. *Scientific Reports*, **6**, 29981. <https://doi.org/10.1038/srep29981>

Okamura, Y., Nishizawa, A., Fujii, Y., and Yanagisawa, H., 2018, Accretionary prism collapse: a new hypothesis on the source of the 1771 giant tsunami in the Ryukyu Arc, SW Japan. *Scientific Reports*, **8** :13620. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-31956-8>



図：海底基準局 OHTM の位置と八重山津波の波源モデル。

A=Imamura et al. (2001); B=Nakamura (2006); C=Nakamura (2009)

**Room C | Regular session : S03. Crustal deformation, GNSS, and gravity**

📅 Wed. Oct 26, 2022 11:00 AM - 12:00 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 2:00 AM - 3:00 AM UTC | 🏢 ROOM C  
8th floor (Training Room 820)

**[S03] AM-2**

chairperson: Yutaro Okada (Kyoto University), Yuto Nakamura (Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard)

11:00 AM - 11:15 AM JST | 2:00 AM - 2:15 AM UTC

[S03-12] Systematic detection of short-term slow slip events along the Japan and Kuril Trenches

\*Yutaro OKADA<sup>1</sup>, Takuya NISHIMURA<sup>2</sup> (1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University)

---

11:15 AM - 11:30 AM JST | 2:15 AM - 2:30 AM UTC

[S03-13] Detectability of plate boundary slip at the Nankai trough and the Japan trench

\*Tadashi ISHIKAWA<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup> (1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo)

---

11:30 AM - 11:45 AM JST | 2:30 AM - 2:45 AM UTC

[S03-14] Possible effect of low viscosity zone along lithosphere-asthenosphere boundary due to earthquake in the Nankai Trough

\*Sota Murakami<sup>1</sup>, Akinori Hashima<sup>2</sup>, Takeshi Iinuma<sup>2</sup>, Kohei Fujita<sup>1</sup>, Tsuyoshi Ichimura<sup>1</sup>, Takane Hori<sup>2</sup> (1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology)

---

11:45 AM - 12:00 PM JST | 2:45 AM - 3:00 AM UTC

[S03-15] Study on viscous flow and rheological heterogeneity caused by large earthquake along the Nankai trough

\*Hisashi SUIITO<sup>1</sup> (1. GSI of Japan)

# Systematic detection of short-term slow slip events along the Japan and Kuril Trenches

\*Yutaro OKADA<sup>1</sup>, Takuya NISHIMURA<sup>2</sup>

1. Graduate School of Science, Kyoto University, 2. Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University

スロースリップイベント（SSE）は低速の断層すべりが数日間から数年間継続する現象であり、通常の地震と比べ時間スケールが長いスロー地震の一種である。オホーツクプレートの下に太平洋プレートが沈み込む日本海溝及び千島海溝では、活発なスロー地震活動が報告されている（e.g., Baba et al., 2020; Nishikawa et al., 2019）。一方で日本海溝ではいくつかの先行研究によってSSEの観測事例が報告されているものの（e.g., Ito et al., 2013; Nishimura, 2021）、千島海溝を含む領域全域におけるSSEの規模・継続期間や時空間分布といった活動様式は依然として不明である。本研究では継続期間が数日間から数週間である短期的SSE（S-SSE）に着目し、陸域のGNSSデータを用いた系統的検出を行うことで、この地域のS-SSEの活動様式の解明を試みる。本研究では国土地理院、海上保安庁、国際GNSS事業により東北日本に設置された529のGNSS連続観測局の1996年12月1日から2021年11月30日までの期間の日座標値を検出に用いた。ノイズを低減するための事前処理として、保守作業等に起因する人為的なオフセット、通常の地震に起因する地表変位、季節変動成分、及び共通誤差成分を取り除いた（Cleveland et al., 1990; Tobita, 2016; Wdowinski et al., 1997）。本研究ではS-SSE系統的検出手法（Okada & Nishimura, in prep.; Okada et al., 2022）を用いてイベントの検出を行った。この手法では、初めに測地マッチドフィルター（Rousset et al., 2017）をGNSSデータの水平成分に適用することでS-SSEの候補となる非定常変位イベントを検出する。続いて、非定常変位イベントの矩形断層モデルと継続期間を推定し（Matsu'ura & Hasegawa, 1987; 宮岡・横田, 2012; Rousset et al., 2017）、これらの推定結果に基づき非定常変位イベントをS-SSEへと分類する。本研究ではS-SSEの可能性の高いイベントをclass 1 SSE、S-SSEの可能性のあるイベントをclass 2 SSEとそれぞれ分類した。また本研究では上記の分類条件に加えて、M6.5以上の通常地震と時空間的に近接する変位イベントを地震に関連するイベントとして取り除いた。

予備解析の結果、25年間で114個のS-SSEの検出に成功した。検出したイベントの多くは関東地方東部の直下及び沖合に分布している（図1）。この地域では先行研究（e.g., Nishimura, 2021）で活発なS-SSEの活動が報告されており、浅部側と深部側に分かれてS-SSEが分布するといった特徴もNishimura (2021)と共通している（図1b）。2017年5月に関東沖合で検出されたイベントは、テクトニック微動（Nishikawa et al., 2019）との間の時空間的同期が確認された。また関東地方ほど活発ではないものの、小規模なS-SSEクラスターが宮城県沖と十勝沖に分布している。このうち、十勝沖で検出されたS-SSEの中には、超低周波地震（Baba et al., 2020）やテクトニック微動（Nishikawa et al., 2019）と時空間的に同期するイベントが確認された。本解析では十勝沖におけるS-SSEは必ず超低周波地震と時空間的に同期するという仮定の下、14件の超低周波地震のバーストを基準にGNSS座標時系列をスタックし矩形断層を推定した。その結果、平均的な断層モデルは2003年十勝沖地震の震源域（Yamanaka & Kikuchi, 2003）の浅部延長に推定された。

一方で予備的な検出結果の中には、明らかに誤検出と考えられる断層すべりで変位パターンを説明し難いイベントや、M6以上の通常地震の地震時変位またはその余効変動をSSEとして検出したと考えられるイベントが多数含まれている。地震に関連する地殻変動の補正とSSEとその他の非定常イベントの分類を解析の中で行ってはいるものの、S-SSEとそれ以外の非定常変位イベントの正確な分類は今後の課題である。

## 謝辞

本研究では国土地理院、海上保安庁、国際GNSS事業より提供されたGNSS RINEXファイルを使用した。本研究で用いたプレート境界モデル(Iwasaki et al., 2015)は、国土地理院の数値地図250mメッシュ（標高）、日本海洋データセンターによる500mメッシュ海底地形データ(J-EGG500, [http://www.jodc.go.jp/data\\_set/jodc/jegg\\_intro\\_j.html](http://www.jodc.go.jp/data_set/jodc/jegg_intro_j.html))及びアラスカ大学アラスカ地理情報ネットワークの地形・水深データ(Lindquist et al., 2004)から作成したものである。

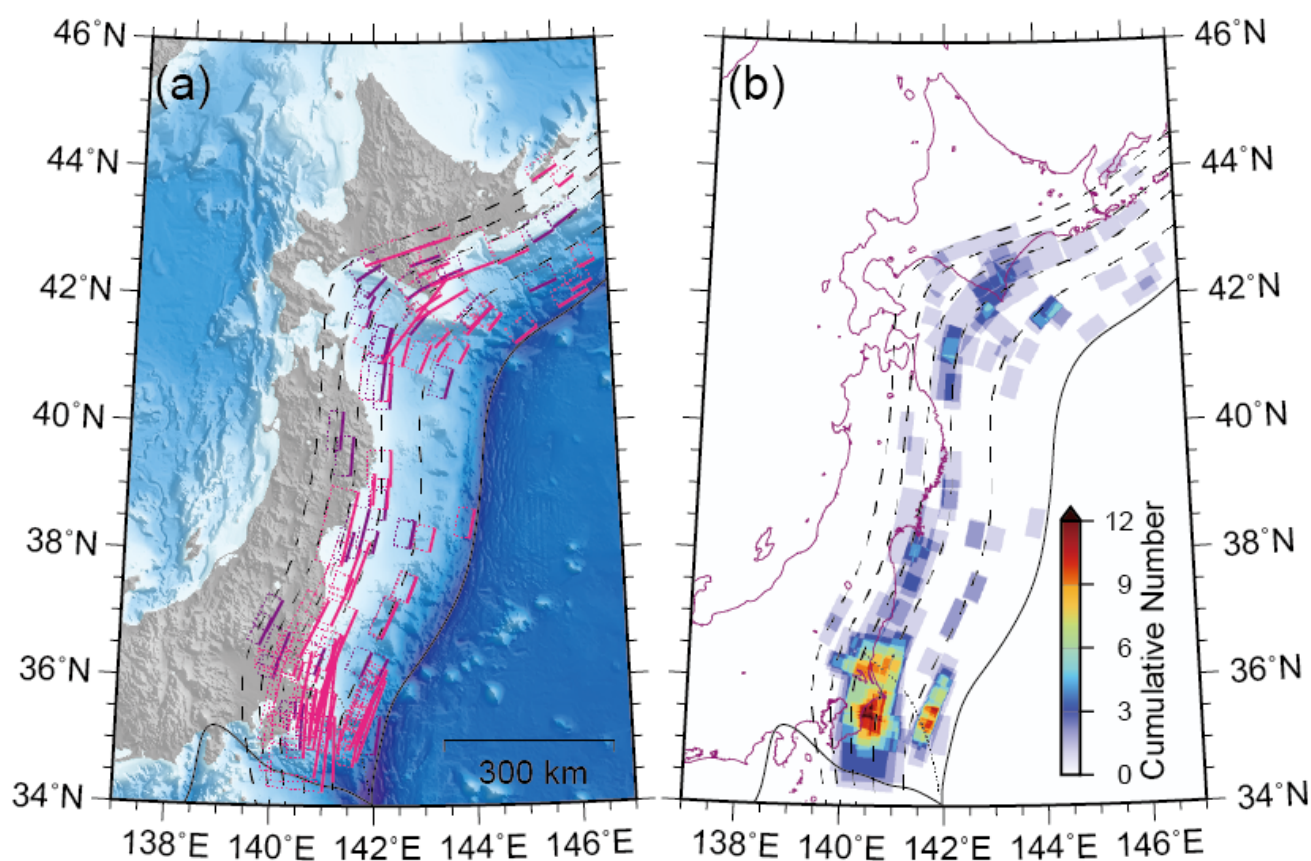


図 1. 予備解析により検出された S-SSE の分布。黒い実線と破線は海溝および 20 km ごとのプレート等深線を示す (Iwasaki et al., 2015)。(a) 検出された S-SSE の断層分布。ピンク色と紫色の長方形はそれぞれ class 1 SSE と class 2 SSE を示す。(b) 検出された S-SSE の累積個数分布。

## Detectability of plate boundary slip at the Nankai trough and the Japan trench

\*Tadashi ISHIKAWA<sup>1</sup>, Yusuke Yokota<sup>2</sup>

1. Hydrographic and Oceanographic Department, Japan Coast Guard, 2. Institute of Industrial Science, the University of Tokyo

地殻変動観測は、地震の発生サイクルにおける断層すべりや固着状態の把握のために重要な情報を提供する。ひとくちに地殻変動観測といっても、対象とする時間スケールを異にする様々な手法がある。その中でも宇宙測地技術を用いた陸上のGNSS観測や海底のGNSS-A観測は、プレートの沈み込みやブロック運動などによる長期的な変動や地震時の永久変位、地震後の余効変動の把握に有効ほか、近年はスロースリップイベントのような短期の変動も重要なターゲットになってきている。現在、国土地理院GEONETによるGNSS観測網や海上保安庁SGO-AによるGNSS-A観測網などの定常観測によって、南海トラフ及び日本海溝の地殻変動場の詳細が把握され、政府の地震調査委員会等の関連会議における地震・地殻活動の現状評価に役立てられている。

地震の発生サイクルを詳細に把握するためには、各サイクルにおいて地下の断層でどのようなすべりが発生しているかを正確に推定する必要がある。そのため、現状の観測技術・観測網でどこまで微小なシグナルが検出可能かその検出能力を評価することは、得られた観測データの妥当性やそれに基づく政府機関における地殻活動の現状評価、さらには今後の観測網の展開を検討するにあたっての重要な指針となる。水藤

(2016) は、GEONETによる日本周辺の海溝におけるプレート境界すべりの検出能力を調査した結果について報告している。震源域となるプレート境界の大部分は海底下にあるため、陸上のGNSS観測のみでは、検出能力が低下する。海上保安庁はその欠点を補うため、日本海溝及び南海トラフ周辺の海底にGNSS-A観測網

(SGO-A) を展開しており、Yokota et al. (2021) は、同様の調査をSGO-Aに適用し、海域における検出能力の向上を定量的に示した。

こうした、地表の地殻変動と地下の断層すべりを結びつける解析の際には、Okada (1992) のような地球を均質な半無限弾性体と仮定したモデルによるグリーン関数がよく使われている。こうしたモデルは簡易でありながら、多くの場合に有用な結果を得ることが可能である。一方で、プレート境界型の巨大地震の震源域を対象とする場合、領域が陸上から海底までの広範囲にわたるため、地下構造の不均質性、観測点の標高差、地球の曲率などの効果が無視できなくなると考えられ、半無限均質弾性体モデルが妥当な近似とならないおそれがある。しかしながら、こうした効果を取り入れようとすると、非常に高い計算コストや複雑な計算が要求され、容易には計算できない。Hori et al. (2021) は、日本海溝及び南海トラフにおいて、これらの効果を考慮したより現実的なモデルによるグリーン関数をあらかじめ計算しライブラリ化した。

このライブラリを用いることで、ユーザーはスーパーコンピュータ等が必要になる複雑な計算と同じ結果を通常のPCで容易に再現可能となる。このグリーン関数ライブラリを用い、Yokota et al. (2021) と同様の検出能力の調査を行った結果、(本原稿執筆時では暫定的な結果ではあるが) 陸域からの検出能力が低下する傾向があるなど、半無限均質媒質モデルとの違いが見えてきている。こうした違いは今後の地殻活動の評価にとっても重要であり、詳細な検討が必要である。

謝辞：本研究では、JAMSTECから提供いただいたHori et al. (2021) のグリーン関数ライブラリを使用しています。記して感謝いたします。

参考文献：

Hori et al. (2021), EPS, <https://doi.org/10.1186/s40623-021-01370-y>

Okada (1992), BSSA, <https://doi.org/10.1785/BSSA0820021018>

水藤 (2016), 測地学会誌, <https://doi.org/10.11366/sokuchi.62.109>

Yokota et al. (2021), PEPS, <https://doi.org/10.1186/s40645-021-00453-4>

## Possible effect of low viscosity zone along lithosphere-asthenosphere boundary due to earthquake in the Nankai Trough

\*Sota Murakami<sup>1</sup>, Akinori Hashima<sup>2</sup>, Takeshi Iinuma<sup>2</sup>, Kohei Fujita<sup>1</sup>, Tsuyoshi Ichimura<sup>1</sup>, Takane Hori<sup>2</sup>

1. Earthquake Research Institute, The University of Tokyo, 2. Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology

プレート沈み込み帯における巨大地震後の地殻変動については、アセノスフェアにおける粘弾性応力緩和と余効すべりの影響が考えられる。2011年に発生した東北沖地震に際しては、海底測地観測点において、地震直後から陸向きの大きな地殻変動が主破壊域直上で観測されており、陸側プレート下のマントルウェッジや海洋プレート下のマントルの粘性を考慮するだけでは説明ができない。この海底観測データの説明として lithosphere-asthenosphere boundary (LAB) と呼ばれるプレート沈み込み帯下の低粘性領域をモデル化することが提案されている。過去、2004年スマトラアンダマン地震や2010年チリ地震といったプレート沈み込み帯の巨大地震においてはLABの検出に足る海底測地観測はなされていない。しかし、将来の海底観測網の充実によりプレート沈み込み帯におけるLABの普遍的な存在が認められる可能性がある。プレート沈み込み帯の一つであり、今後数十年以内に巨大地震の発生が危惧されている南海トラフにおいては、日本海溝と同様な海底測地観測網が備わっている。しかしながら、過去の地震においては、LABに対する感度が高い海底測地観測はなされていない。そこで、本研究では、想定される南海トラフにおける巨大地震に対し、LABの低粘性が地震後の地殻変動にどのような影響を与えるかを定量的な評価を行った。本研究では、南海トラフの現実的な地下構造モデルを考慮した粘弾性応力緩和による地殻変動解析を実施した。現実的な地下構造を考慮するために、対象領域を2500km x 2500km x 1100kmとし、最小要素サイズを500mとした $4.2 \times 10^9$ 自由度の大規模な有限要素モデルを作成した。このような大規模なモデルによる解析においては、多大な計算コストを要するため、計算コストを著しく削減可能な地殻変動解析手法 (Ichimura et al., 2016) を導入することで、粘弾性解析を実現している。マントルウェッジと海洋マントルにおいて粘性率が異なる場合やLABの粘性率の異なるケースにおける、地震時すべりに対する4年間の地表面応答を計算した。計算の結果、LABの粘性率が $2.5 \times 10^{17}$  Pasと低粘性が著しい場合、2011年東北沖地震の場合と同様に、海域で陸向きの非常に大きい水平変位が生じた。また、鉛直変位については、ケースによって隆起と沈降の分布が変わる複雑な挙動が見られた。これらの変形は、時間経過とともに急速に減衰していくことから地震後初期での観測が有効であることが分かった。具体的には、地震後1年間に於いて、GNSS音響結合方式(GNSS-A)の海底観測点の観測精度を上回る非常に大きな値を持つことから、検知できる可能性が高いことがわかった。一方で、LABの粘性率が $2.5 \times 10^{18}$  Pas程度である場合、LABが存在せず海洋マントルの粘性率を $1.0 \times 10^{19}$  Pasで一様とした場合と似た変形パターンが見られた。この場合、現状の観測精度を上回る差が生じないことから、検知が難しいことがわかった。ただし、GNSS-Aにおける高頻度観測や、DONETにおける観測精度向上など、海底観測技術の進展により検知できる可能性がある。なお、今回は南海トラフのいわゆる全割れ破壊を想定した場合の地表面応答を計算したが、半割れでの地震が発生する可能性があることや、実際のより複雑なレオロジー構造によって応答が異なる可能性がある。こうした複数の地震シナリオやレオロジーによる応答の違いを調べることで、LABの検出可能性を検討することが今後の課題である。

# Study on viscous flow and rheological heterogeneity caused by large earthquake along the Nankai trough

\*Hisashi SUTO<sup>1</sup>

## 1. GSI of Japan

### ・はじめに

南海トラフ沿いでは、100～200年の間隔でプレート境界での大規模地震が繰り返し発生している。「南海トラフ沿いの大規模地震の予測可能性に関する調査部会（内閣府）」（平成29年8月）では、防災対応を検討するケースとして4つの典型的ケースに整理している。このうち、想定震源域の東側（片側）だけで大規模地震が発生しば場合（ケース1）、想定震源域で一回り小さいM7クラスの地震が発生した場合（ケース2）では、大規模地震の発生につながる可能性を検討するために、プレート境界の固着状態（＝余効すべり）の正確な把握が必要となる。従来、初期の余効変動の主要因は余効すべりに起因すると考えられてきた。しかし、平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震の余効変動に関する解析では、地震後の粘性緩和の影響を考慮した場合としない場合とで、推定される余効すべりの場所と大きさが大きく異なることが分かってきた。従って、余効すべりを正確に推定するためには粘性緩和の見積もりが重要であり、その見積もりには適切な地下の粘弾性構造と粘性率が必要である。最終的には粘弾性構造と粘性率の見積もりが重要であるが、本稿ではその前段階として、1944年東南海地震と1946年南海地震の断層モデルを参考に南海トラフ沿いで発生する大規模地震の地震時の変動を計算し、粘性緩和による変動が、粘性構造のどの領域が地表のどの場所の変動に、どのように影響するのかについて報告する。

### ・各粘弾性領域における変動の特徴

南海トラフ沿いの粘弾性構造は大きく2つの領域に分けられる。一つは陸域の大陸プレート下に位置するウェッジマントル、もう一つはフィリピン海プレート下の海洋アセノスフェアである。これら2つの粘弾性領域における粘性緩和は、ほぼ真逆の変動を引き起こす。1946年南海地震を想定した場合、ウェッジマントルの粘性緩和は、日本海側を中心として海溝軸に向かう南東方向の水平変動と日本海側を中心として陸域でわずかな隆起を引き起こす。一方、海洋アセノスフェアの粘性緩和は、ウェッジマントルの粘性緩和とはほぼ真逆で、太平洋側の海域から陸域の一部では海溝軸から離れる北西方向の水平変動、太平洋側の海域で隆起、陸域でわずかな沈降を引き起こす。ただし、日本海側の陸域ではウェッジマントルの粘性緩和と同じく、海溝軸に向かう南東方向の水平変動が生じる。太平洋側の陸域における水平変動の方向や隆起、沈降の境界は、地震時のすべり分布に強く依存し、太平洋側の陸域でも海溝軸に向かう南東方向の水平変動が引き起こされる場合もある。

次に1944年東南海地震を想定した場合、1946年南海地震の場合と概ね同じ傾向である。ウェッジマントルの粘性緩和は陸域を中心として海溝軸に向かう南東方向の水平変動が卓越する。一方、海洋アセノスフェアの粘性緩和はほぼ海溝軸から離れる北西方向の水平変動が卓越し、太平洋側の海域で隆起、陸域でわずかな沈降を引き起こす。1946年南海地震の場合に見られた日本海側の陸域での南東方向の水平変動はほとんど見られない。

フィリピン海プレートは低角で沈み込んでいるために粘性緩和を引き起こすウェッジマントルの領域が狭い。そのため、海洋アセノスフェアの粘性緩和の影響の方が顕著であると考えられる。また、フィリピン海プレートの厚さが30～40kmと太平洋プレートに比べると薄いことも、海洋アセノスフェアの粘性緩和の影響が顕著になる一因であると考えられる。従って、南海トラフで発生する大規模地震の粘性緩和の影響を評価する上では、ウェッジマントルよりも海洋アセノスフェアの粘性率の方が重要と考えられる。今後、1944年東南海地震および1946年南海地震後の地殻変動の観測データを精査し、適切な粘弾性構造と粘性率を推定していく。また、2004年紀伊半島南東沖の地震の余効変動データも粘性率を制約するには有効だと考えている。

**Room C | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system**

📅 Wed. Oct 26, 2022 1:30 PM - 2:45 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 4:30 AM - 5:45 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S02] PM-1**

chairperson: Masayuki Yoshimi (The National Institute of Advanced Industrial Science and Technology), Masayuki Obayashi (JAMSTEC)

1:30 PM - 1:45 PM JST | 4:30 AM - 4:45 AM UTC

[S02-01] The Explosive Hunga Tonga Eruption observed by an Array of Hydroacoustic MERMAID Floats

\*Masayuki OBAYASHI<sup>1</sup>, Junko Yoshimitsu<sup>1</sup>, Hiroko Sugioka<sup>2</sup>, Joel D Simon<sup>3</sup>, Yu Yong<sup>4</sup> (1. JAMSTEC, 2. Kobe University, 3. Princeton University, 4. SUSTech)

---

1:45 PM - 2:00 PM JST | 4:45 AM - 5:00 AM UTC

[S02-02] Study on the underwater acoustic signals associated with the eruption at Fukutoku-Oka-No-Ba observed with the OBSs of S-net

\*Ryoichi IWASE<sup>1</sup> (1. JAMSTEC)

---

2:00 PM - 2:15 PM JST | 5:00 AM - 5:15 AM UTC

[S02-03] Simultaneous observation of passing vehicles using DAS, a video camera, and a broadband seismometer on National Route 4

\*Katsuhiro YABU<sup>1</sup>, Hisashi NAKAHARA<sup>1</sup>, Kentaro EMOTO<sup>2</sup>, Takeshi NISHIMURA<sup>1</sup> (1. Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University.)

---

2:15 PM - 2:30 PM JST | 5:15 AM - 5:30 AM UTC

[S02-04] Characteristics of DAS records for earthquakes and controlled sources on off-Sanriku seafloor optical fiber cable

\*Masanao SHINOHARA<sup>1</sup>, Tomoaki Yamada<sup>1</sup>, Hiroki Takano<sup>2</sup>, Eiji Kurashimo<sup>1</sup>, Rie Nakata<sup>1</sup>, Kimihiro Mochizuki<sup>1</sup>, Takeshi Akuhara<sup>1</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup> (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. ERI, now at INPEX Co., 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo)

---

2:30 PM - 2:45 PM JST | 5:30 AM - 5:45 AM UTC

[S02-05] Earthquake observation by Distributed Acoustic Sensing on optical fiber along a Shinkansen track around Suruga Bay

\*Masayuki YOSHIMI<sup>1</sup>, Satoshi IDE<sup>2</sup>, Teppei ENARI<sup>3</sup>, Daiki TAYA<sup>3</sup>, Shuji IWATA<sup>4</sup> (1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Graduate School of Science, Tokyo Univ., 3. Earthquake Research Institute, Tokyo Univ., 4. Central Japan Rail Company)

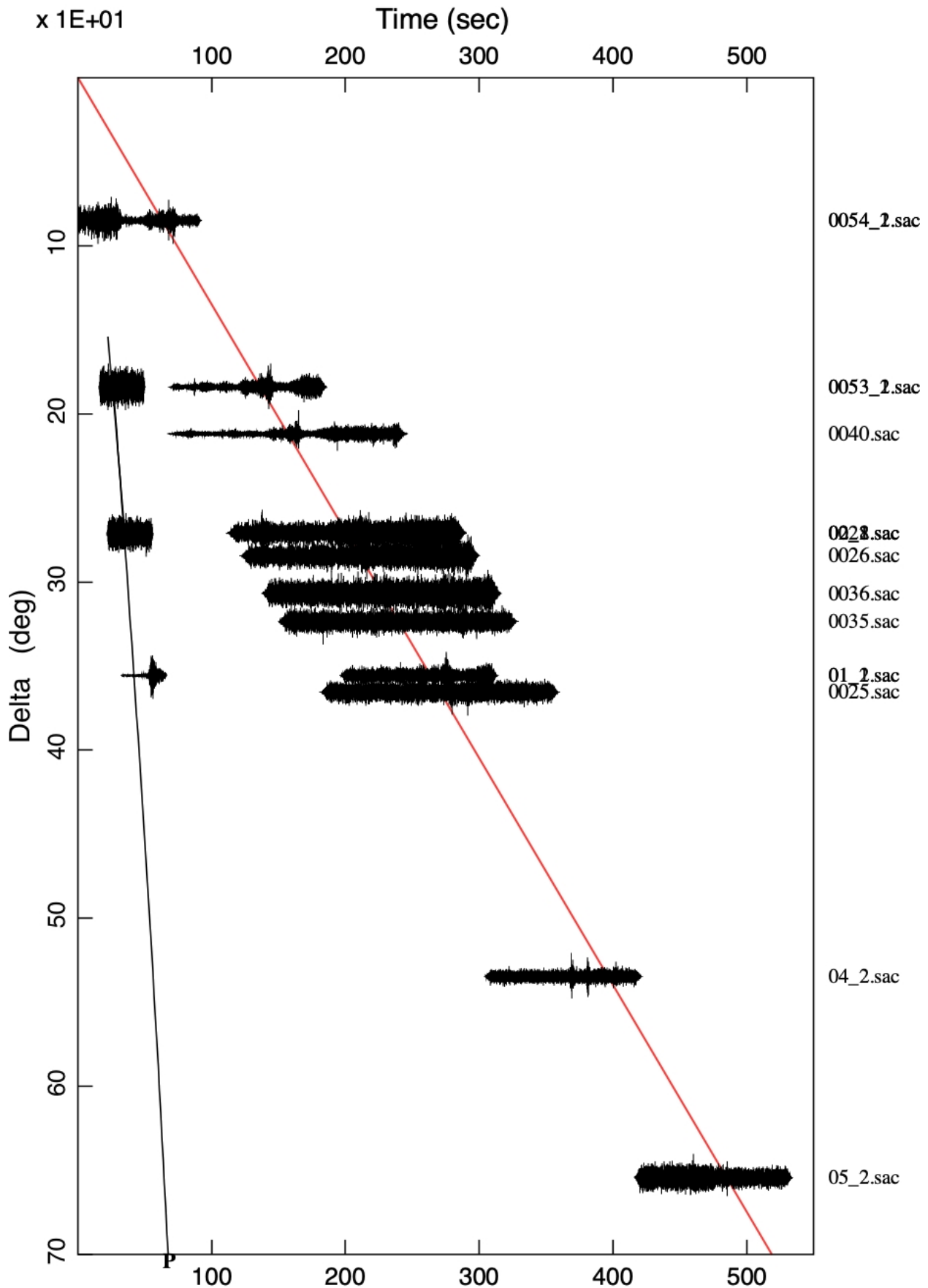
## The Explosive Hunga Tonga Eruption observed by an Array of Hydroacoustic MERMAID Floats

\*Masayuki OBAYASHI<sup>1</sup>, Junko Yoshimitsu<sup>1</sup>, Hiroko Sugioka<sup>2</sup>, Joel D Simon<sup>3</sup>, Yu Yong<sup>4</sup>

1. JAMSTEC, 2. Kobe University, 3. Princeton University, 4. SUSTech

現在約50 台のMERMAID (Mobile Earthquake Recording in Marine Areas by Independent Divers) フロートが南太平洋の海中を漂流しており、地球深部内部構造を求めることを目的に高周波 (~1 Hz) P 波から海底で変換された水中音波をハイドロフォンで観測し、その波形データを衛星通信を利用して準リアルタイムで送信している。このMERMAIDフロートアレイは国際プロジェクトSPPIM (South Pacific Plume Imaging and Modeling) の下2018 年の展開以来、ホットスポットとプルームに富む南太平洋下マントルを通る新しい波線経路のグローバルな地震の高品質P波波形データを何千も記録してきた。MERMAIDフロートはP波から変換された水中音波を観測する自律型フロートであるが、漂流深度 (通常1500 m) で周囲の音響場から地震特有の信号を検出するアルゴリズムを備え、地震が検出されると海面に浮上しその波形を送信する。さらに、MERMAIDフロートには双方向イリジウム通信を介して1年間取得可能なデータバッファが装備されている。従って、MERMAID フロートは、地震P波を準リアルタイムに自動的に送信するシステムを有する一方で、自動的に送信されなかった期間でも陸上からのリクエストにより関心のある期間のデータを切り出すための連続データも保存している。MERMAIDフロートは海洋島の地震計、海底地震計、係留型ハイドロフォンのいずれでもなく、MERMAIDフロート特有のデータであり、発表では、2022 年 1 月の爆発的な Hunga Tonga噴火に焦点を当てたリクエストにより得られたSPPIM MERMAIDフロートアレイのデータを紹介する。

# 2022 01 15 04:14:45 [-20.5453 -175.394] Hunga Tonga



MERMAIDで捉えたフンガ・トンガ噴火によるT-phase。横軸、縦軸はそれぞれ噴火時刻からの時間、火山からの距離。赤線は水中音波速度1.5 km/sを仮定した時の走時を表す。

## Study on the underwater acoustic signals associated with the eruption at Fukutoku-Oka-No-Ba observed with the OBSs of S-net

\*Ryoichi IWASE<sup>1</sup>

### 1. JAMSTEC

岩瀬(2022)では、2021年8月13日に福徳岡ノ場において発生した海底火山噴火、及び2022年1月15日にフンガ・トンガ-フンガ・ハアパイ（フンガ火山）で発生した海底火山噴火について、防災科学技術研究所の「日本海溝海底地震津波観測網」(S-net)を構成する海底地震計の観測波形を用い、深海サウンドチャンネル（Sound Fixing and Ranging, SOFARチャンネル）を伝搬した噴火に伴う水中音響信号を検出した。具体的には、噴火地点からS-net各観測点までの音波の伝搬時間を考慮して、時間軸を観測点毎にずらして描画したスペクトログラムを比較することにより、視覚的に噴火に伴う水中音響信号を識別した。今回、この識別結果をもとにして、福徳岡ノ場噴火に伴う水中音響信号について考察を加えた。使用したデータは岩瀬(2022)と同じく、S-netの各観測点を構成する2種類の地震計のうち速度計を使用し、もう一方の地震計である加速度計で計測される重力の方向をもとに鉛直成分を算出した波形データであり、サンプリング周波数は100 Hzである。元の波形データには地震に伴う信号や船舶ノイズ等が多数含まれているが、スペクトログラムを参照すると、噴火に伴う信号が有する周波数成分の検出下限は、観測点によって相違があるものの、およそ5 Hz程度と判断される。一方、ノイズ状況も観測点によって相違があるものの、10Hz以下ではノイズレベルが比較的低い状況となっている。そこで今回5Hzから10 Hzまでの周波数帯域を透過するバンドパス・フィルタの適用を試みた。当該フィルタ適用後の波形に対して観測点毎に時間軸を伝搬時間分ずらし、更にそれを伝搬距離順に並べた結果をFig.1に示す。なお伝搬時間は伝搬距離(大円距離)を音速(1500 m/s)で割って求めた。横軸は各観測点で検出した信号の音源での発出時刻に相当する。縦軸は伝搬距離(km)である。なお波形を表示した観測点は噴火に伴う信号を検出した44観測点のみを選択している。SOFARチャンネルを音速で伝搬した噴火に伴う信号は横軸の同じ位置に出現するので、噴火イベントとして識別可能となる。Fig. 1は2021年8月13日05:00 JSTから1時間の記録である。下向き三角印で示した05:57頃にパルス形状の波形が存在するが、それに先立つ05:55頃からのイベント発生が確認できる。Fig. 2は、05:56 JSTからの2分間の波形を拡大したものであるが、イベント波形の出現位置がやや傾いていることがわかる。そこで、音速を1472 m/sとして描画したものをFig. 3に示す。Fig. 2に比べ、イベント波形の出現位置が揃っていることがわかる。そこで音速を同じく1472 m/sとして、05:54 JSTからの5分間の波形をFig. 4に示す。05:55 JSTの少し前からの噴火活動の開始が推定される。今後フンガ火山の噴火に伴う信号についても同様な解析を行う予定である。

### 謝辞

本研究の実施に際し防災科学技術研究所の公開データ(<https://doi.org/10.17598/NIED.0007>)を利用しました。伝搬距離の計算には国土地理院のサイト(<https://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/surveycalc/surveycalc/bl2stf.html>)を利用しました。

### 参考文献

岩瀬(2022), JpGU2022, SVC31-21.

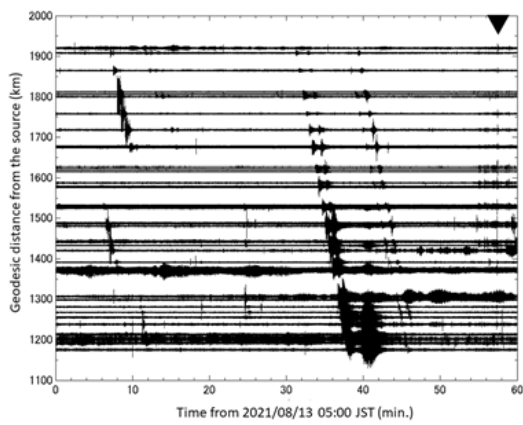


Fig. 1

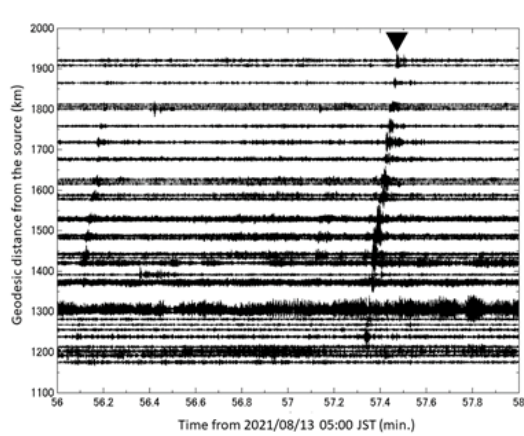


Fig. 2

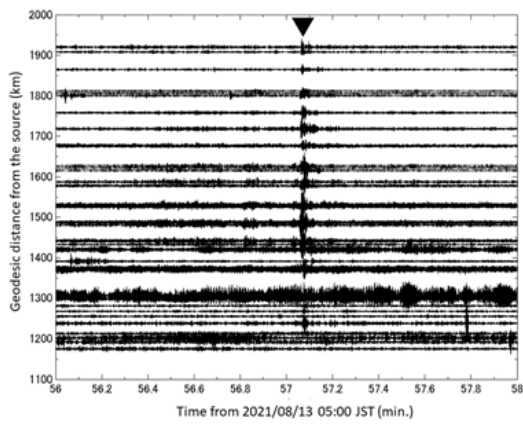


Fig. 3

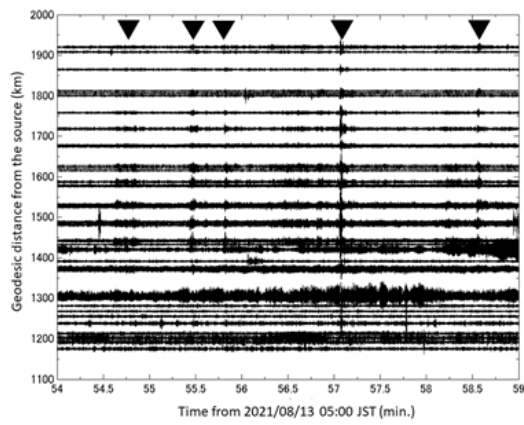


Fig. 4

## Simultaneous observation of passing vehicles using DAS, a video camera, and a broadband seismometer on National Route 4

\*Katsuhiro YABU<sup>1</sup>, Hisashi NAKAHARA<sup>1</sup>, Kentaro EMOTO<sup>2</sup>, Takeshi NISHIMURA<sup>1</sup>

1. Solid Earth Physics Lab., Geophysics, Science, Tohoku University, 2. Institute of Seismology and Volcanology, Faculty of Science, Kyushu University.

DAS (Distributed Acoustic Sensing) は既存の光ファイバーケーブルに計測装置を接続するだけで、数m間隔で数十kmにわたるケーブル軸方向の歪みまたは歪み速度を計測できることから、近年地震学において導入が進んでいる。我々のグループは、2020年に宮城県内を通る国道4号線沿いに埋設されている通信用の光ファイバーケーブルを利用してDAS観測を行った(江本・他, 2020, 地震学会)。矢武・他(2021, 地震学会)では車両が励起する表面波の分散曲線を用いて浅部S波速度構造を推定した。しかし、位相だけではなく振幅も含めたDASの歪み波形を解釈するためには、車両が振動を励起する過程を詳しく理解する必要性を痛感した。そこで今回、DASの観測を再び行うにあたり、測線の間地点近くの大衡村の1か所において、ビデオカメラ、広帯域地震計を用いた観測も並行して実施した。本発表では、その観測の概要と、映像から得られる通過する車両の特徴とDAS歪み波形記録、広帯域地震計記録との関係についてこれまでに分かったことを紹介する。

Sintela社のDASの計測装置(ONYX)を国土交通省古川国道維持出張所内に2022年3月から4月の約1ヶ月間設置し、そこから南の仙台方向に国道4号線に沿って伸びている約50kmの光ファイバーケーブルに接続した。ゲージ長は9.57m、チャンネル間隔は6.38m、サンプリング周波数は200Hzとした。本観測機器の出力信号は歪みである。ビデオカメラと広帯域地震計は、大衡村の国道4号線沿道の民家の敷地内に設置した。近傍の車道は片側1車線ずつの計2車線であり、観測場所と車道中央までの距離は約9m、光ファイバーケーブルは観測場所から遠い方の車線の深さ約2.3mに埋設されている。広帯域地震計はナノメトリクス社の広帯域3成分速度計 Trillium Compact を使用し、計測技研の HKS-9700 でデータを連続収録した。ビデオカメラはパナソニック社 HC-VZX990M-W を使用し、観測期間中の数日間において断続的に車道方向の映像を記録した。

映像において車両を確認できた際には、広帯域地震計やDASに車両の通過に伴う地面の振動が記録されている。図は、大型トラックが通過した際の各記録の例である。DASの波形記録と映像とを比較すると、車両が最も光ケーブルに近づいたと考えられる時刻に歪み記録は伸びのピークを示し、その前後では縮みを示した。また、表面波の伝播によると考えられるより高周波の振動も捉えられた。コーナー周波数5Hzのローパスフィルタをかけた地震計記録には、同時刻の上下動成分にランプ状の波形が見られることが多かった。一方、水平成分は常に脈動と思われる周期状の波形が見られることが多かった。

映像記録から、軽自動車、普通自動車、普通貨物自動車・マイクロバス、大型貨物自動車・バス、超大型貨物、の5つに分類することができる。そこで、それぞれの車両通過に伴う最大ひずみ量を車両種別ごとに算出した。

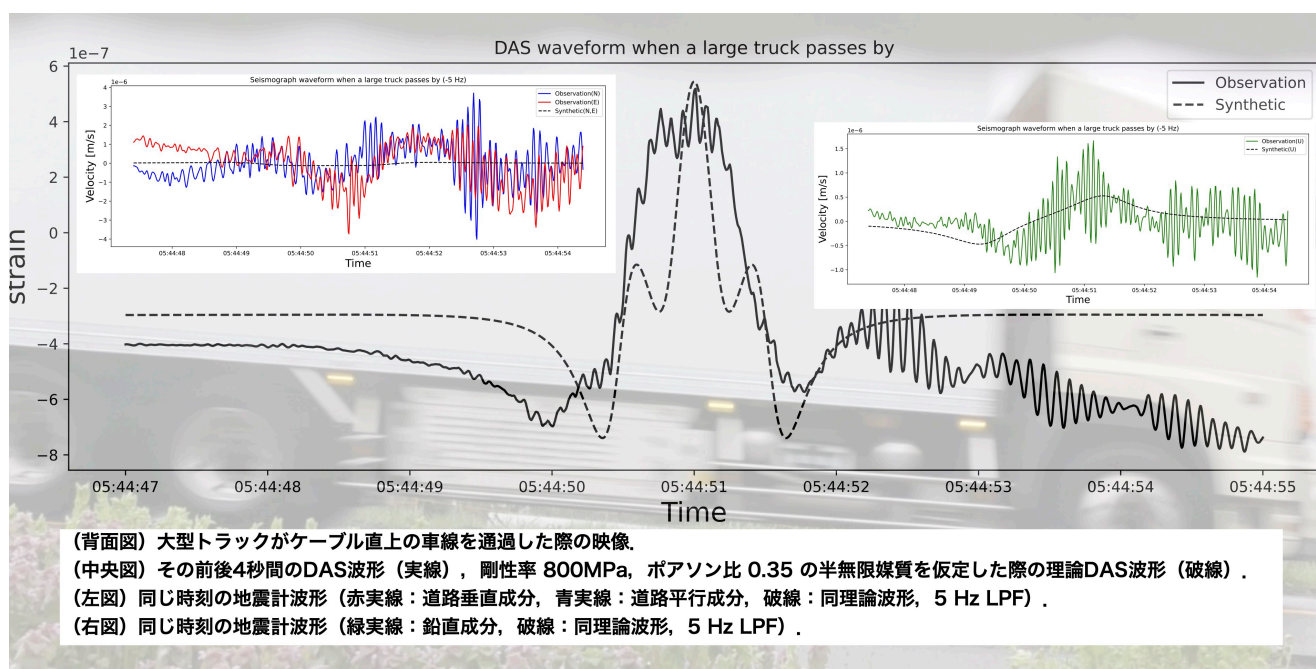
その結果、最大ひずみ量の平均値は、各車種カテゴリーの代表的な荷重の大きさにほぼ比例し、また、光ケーブルの直上の車線を走行する場合の方が、より大きいことがわかった。パルス幅については、大型の車両ほど長くなる傾向にあるが、同じ車両種別でもそのばらつきは大きいことがわかった。

これらの結果を定量的に解釈するため、半無限媒質表面の鉛直荷重に対する変位応答を計算する Boussinesq 問題の解を利用した。車両が一定速度で観測点を通過すると仮定すると、理論DAS波形を水平方向にゲージ長分離れた観測点間の Boussinesq 解による変位の水平成分の差と走行速度を用いて表すことがで

きる (Jousset et al., 2018) . この時、荷重は映像を基に求めたタイヤの位置に等しく分配されているとした。観測波形は、理論波形の形状に類似していることから、各車種カテゴリーの代表的な荷重と最大ひずみ量の平均値を基に、観測地点付近の地盤の弾性パラメータは、剛性率 800 MPa 程度、ポアソン比 0.35 程度と推定された。また、パルス幅が同じ車両種別でもばらつくのは、走行速度が異なるためであると解釈できる。さらに、このパラメータを用いて地震計の理論波形を同様に求めた。水平動成分は他のノイズが乗っていることが多かったものの、上下動成分の速度は複数の車両に対して観測値をよく説明することができた。

本研究では動画を併用したことで車両の特定を行うことが可能となり、多様な荷重源を基に弾性パラメータの推定精度を高めることができた。また、DASの解析結果を地震波形を用いて検証することもできた。さらに今後、この地点で求めた各車両の荷重を基に、車両が移動した先の映像記録がない地点においてもDAS記録を用いて弾性パラメータを求める予定である。

(謝辞) 国土交通省所有の光ファイバーを使用させていただいた。観測に当たって、仙台河川国道事務所の方々に便宜を図っていただいた。また、地震計とカメラの設置については、大衡村の石川敏氏様に多大なご協力をいただいた。

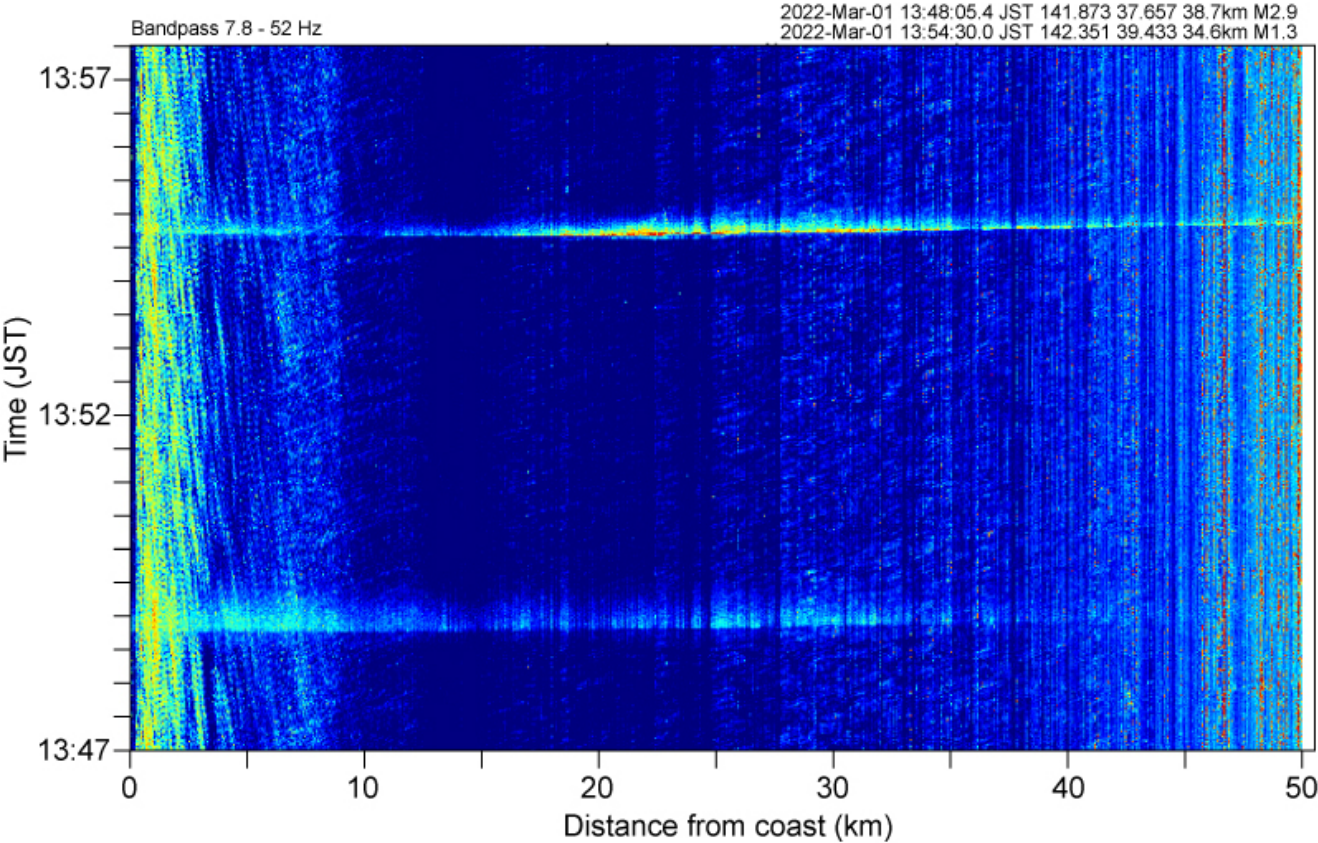


## Characteristics of DAS records for earthquakes and controlled sources on off-Sanriku seafloor optical fiber cable

\*Masanao SHINOHARA<sup>1</sup>, Tomoaki Yamada<sup>1</sup>, Hiroki Takano<sup>2</sup>, Eiji Kurashimo<sup>1</sup>, Rie Nakata<sup>1</sup>, Kimihiro Mochizuki<sup>1</sup>, Takeshi Akuhara<sup>1</sup>, Shin'ichi Sakai<sup>3</sup>

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. ERI, now at INPEX Co., 3. Interfaculty Initiative in Information Studies, the University of Tokyo

散乱波の干渉計測による分散型音響センシング(DAS)は光ファイバセンシングの一つであり、ファイバに沿って短い計測間隔で、長距離に渡って記録が得られることから、地震観測にも適用されている。干渉計測を用いたDAS計測は徐々に正確さが向上しており、現在は、質の高い記録が得られるようになってきている。現在海域において地震観測を行っている観測点はまだ数が少ないが、海底ケーブルを用いたDAS計測は線状ではあるが、海底観測点数を大幅に増加させることが可能で、今後が期待されている。1996年に東京大学地震研究所により設置された三陸沖海底光ケーブル地震津波観測システムは、拡張用に6本の予備ファイバがあり、この予備ファイバをDAS計測に使うことができる。そこで、2019年2月以降、予備ファイバを用いて、計8回の臨時観測を行っている。それぞれの観測期間は2日から2ヶ月である。収録チャンネル間隔が10m以下で、収録距離は長いときで100kmに達する。計測精度を示すゲージ長は10mから100mである。それぞれの観測において、微小地震を含む多数の地震が記録された。2019年2月の第1回の観測では、気象庁が決定したマグニチュード1.8以上のケーブルシステムから震央距離200km程度までの地震はすべて確認することができた。また、震央距離が約2,300kmであるマグニチュード6.6の遠地地震も記録された。三陸沖海底光ケーブル観測システムには、3地点において3成分加速度計が接続されており、DASデータとの比較が可能である。DASはファイバ方向の歪を計測しているが、単純な仮定の基で加速度に変換できる。その結果、現在の干渉計測によるDAS観測のノイズレベルは、ケーブルシステムに接続されている加速度計とほぼ同程度であることが確かめられた。DAS計測は陸上局から約100km沖合までを空間的に高密度で観測していることから、海岸線から沖合に至るノイズスペクトルの空間変化を求めることもできた。2020年11月に三陸沖海底光ケーブルのDAS計測と制御震源による構造探査実験を行った。使用した制御震源はBolt社1500LLエアガン（1台あたり容量1500cu.in.）4台とSercel社GIガン（1台あたり容量355 cu.in.）2台の2種類である。陸上局舎において、2本のファイバ末端にそれぞれ計測器を接続し、2台による同時DAS観測を行った。DASの収録はサンプリング500Hz、チャンネル間隔5m、ゲージ長40m、観測総距離100km（一部80km）である。1500LLエアガンの測線は、海底ケーブル敷設ルートとその延長の全長約200kmである。発震間隔は約100mとした。GIガンの測線は、海底ケーブル敷設ルートのみ約100kmであり、この測線上を2回発震した。発震間隔は約50mである。エアガン発震中はDAS計測を実施すると共に、発震を行う観測船から、ストリーマケーブルを曳航して、記録を収録した。収録されたデータは、2つの計測器間に大きな差はないことが確認された。また、DAS計測による制御震源の記録とケーブルシステムの加速度計による記録を比較したところ、DAS記録ではP波振幅が小さいことが確認された。構造探査実験では、海底において5mの間隔で全長80km以上の収録が行われており、高分解能な反射断面が得られることが期待される。そのため、得られたDASデータに対して基本的な反射処理を施し評価を行った。まず、DAS計測により記録された制御震源の水中直接波の走時を用いて、ケーブル位置の再決定を行った。その後、CMPソート、bandpass処理、単純なdeconvolution処理を行った後に、定速度重合により反射断面を作成した。DASデータは反射波の連続性が高くないために、定速度重合法による速度解析を行った。震央距離が3km以内のCMP gatherにおいて、1500LLエアガン記録に対しては1.0km/s、GIガン記録に対しては0.8km/sとして、定速度重合により反射断面図を作成した。DAS計測による反射断面図をストリーマケーブルによる反射断面と比較したところ、反射面の走時は異なるが、基本的に同じ反射面を示していると解釈された。DAS計測による反射断面における反射面の海底面からの往復走時は、ストリーマケーブルによる反射断面における同じと思われる反射面の海底面からの往復走時の約2~5倍となっている。反射面まで比較的長い往復走時やCMP重合の遅い重合速度などから、得られたDAS計測による反射断面は変換されたS波による反射波が卓越していると考えられる。



## Earthquake observation by Distributed Acoustic Sensing on optical fiber along a Shinkansen track around Suruga Bay

\*Masayuki YOSHIMI<sup>1</sup>, Satoshi IDE<sup>2</sup>, Teppei ENARI<sup>3</sup>, Daiki TAYA<sup>3</sup>, Shuji IWATA<sup>4</sup>

1. Geological Survey of Japan/AIST, 2. Graduate School of Science, Tokyo Univ., 3. Earthquake Research Institute, Tokyo Univ., 4. Central Japan Rail Company

東海道新幹線の軌道沿いに布設された通信用光ケーブルを用いて、約三ヶ月間（2021年8月30日から11月23日）にわたるDAS観測（AP sensing製 N5226A）を実施した。新幹線や交通車両等による振動に加え、複数の地震記録が取得された。本発表では、計測の概要、光ケーブル設置条件と観測記録の特性、地震計記録との比較、テンプレートマッチングによる火山性低周波地震の検出試行結果を報告する。測定対象は小田原―掛川区間であり、このうち熱海―静岡区間（約75km）で74日間、熱海―小田原区間、静岡―掛川区間でそれぞれ2日間および3日間程度の連続観測を実施した。DAS観測に並行して、新丹那トンネル内の3箇所、富士川橋梁上、および、沿線の3箇所に広帯域地震計もしくは加速度計による観測を行った。DASの計測パラメータは、機器が設定を許す最大のサンプリングレートおよびゲージ長（空間サンプリング5.1m、ゲージ長40.8m、サンプリング周波数は熱海―静岡区間では1000Hz、それ以外では2000Hz）とした。1分間のデータ量は、熱海―静岡区間（約75km：約15000ch）で1.72GB、静岡―掛川区間（約45km：約9000ch）で2.1GB、熱海―小田原間（約19km：約3800ch）で0.87GBであり、観測期間全体で200TBあまりのデータ量となった。測定区間の新幹線軌道は、トンネル、橋梁、高架橋、盛土、掘割、自然地盤など様々な地盤・構造物上に設置されている。光ケーブルは、トンネルでは壁面に架けられ、それ以外の場所では線路脇等の配線箱もしくは配線棚に格納されている。新幹線通過時には位相跳びによる振幅の頭打ちが生じるものの、新幹線による振動が記録され、設置環境による振動特性の違いが明瞭であった。トンネル区間では、新幹線の突入に伴う微気圧波による振動が音速で伝搬する様子も観測された。観測期間中には房総沖、千葉中部、静岡県中部等を震源とする地震（有感）が発生し、これらのDAS計測波形が取得された。P波、S波のオンセットは概ね明瞭であった。後続波群は地震に関わらず場所ごとにほぼ同一の周波数帯域に収斂し、構造物―地盤系の振動特性を反映しているものと推察される。計測区間北方には富士山の火山性低周波地震の震源域がある。低周波地震のシグナルが明瞭に認識できるDAS計測波形のうち10秒区間をテンプレートにして、Matched Filter解析を実施した。約360万個の相互相関値のうち6 $\sigma$ 以上のもの（112個）の中に、富士山の火山性低周波地震は21個（テンプレート地震含む）含まれていた。同じ期間の気象庁カタログに含まれるもの23個のうち12個、含まれないものも9個検出された。M0.5を超える低周波地震は概ね検出でき、また約5分間続く低周波地震活動も検出できていた。構造物設置の光ケーブルを用いたDAS観測は、当該構造物の振動特性把握など工学的に有用であるばかりでなく、地震検知など理学目的の自然地震観測にも有用である。

## Room C | Regular session : S02. Seismometry and monitoring system

📅 Wed. Oct 26, 2022 3:00 PM - 4:15 PM JST | Wed. Oct 26, 2022 6:00 AM - 7:15 AM UTC | 🏢 ROOM C 8th floor (Training Room 820)

**[S02] PM-2**

chairperson: Hajime Shiobara (Earthquake Research Institute, The University of Tokyo), Toshinori Sato (Chiba University)

3:00 PM - 3:15 PM JST | 6:00 AM - 6:15 AM UTC

**[S02-06] Classification for Earthquakes with Linked Data**

\*Hiroki UEMATSU<sup>1,2,3</sup>, Ahyi Kim<sup>3</sup>, Hideaki Takeda<sup>1,2</sup> (1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. National Institute of Informatics, 3. Yokohama City University)

3:15 PM - 3:30 PM JST | 6:15 AM - 6:30 AM UTC

**[S02-07] Development of multi-platform next-generation WIN system (2)**

\*Shigeki NAKAGAWA<sup>1</sup>, Hiroshi AOYAMA<sup>2</sup>, Hiroaki TAKAHASHI<sup>2</sup>, Takuto MAEDA<sup>3</sup>, Naoki UCHIDA<sup>1</sup>, Mare YAMAMOTO<sup>4</sup>, Kazuo OHTAKE<sup>5</sup>, Hiroshi TSURUOKA<sup>1</sup>, Yosuke AOKI<sup>1</sup>, Yuta MAEDA<sup>6</sup>, Shiro OHMI<sup>7</sup>, Haruhisa NAKAMICHI<sup>7</sup>, Makoto OKUBO<sup>8</sup>, Takeshi MATSUSHIMA<sup>9</sup>, Hiroshi YAKIWARA<sup>10</sup>, Katsuhiko SHIOMI<sup>11</sup>, Kenji UEHIRA<sup>11</sup>, Hideki UEDA<sup>11</sup>, Kazuki MIYAOKA<sup>12</sup>, Koji TAMARIBUCHI<sup>13</sup>, Ryo HONDA<sup>14</sup>, Shutaro SEKINE<sup>15</sup> (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Systems Design Lab, the University of Tokyo, 6. Nagoya University, 7. Kyoto University, 8. Kochi University, 9. Kyushu University, 10. Kagoshima University, 11. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 12. Japan Meteorological Agency, 13. Meteorological Research Institute, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction)

3:30 PM - 3:45 PM JST | 6:30 AM - 6:45 AM UTC

**[S02-08] Hypocenter location system with automatic correction of picking data by relative hypocenter location method**

\*Shigeki Horiuchi<sup>1</sup>, Yuko Satou<sup>1</sup>, Yoshihisa Iio<sup>2</sup>, Aitarou Kato<sup>3</sup>, Tomomi Okada<sup>4</sup> (1. Home Seismometer Corporation, 2. Kyoto Univ., 3. Univ. of Tokyo, 4. Tohoku Univ.)

3:45 PM - 4:00 PM JST | 6:45 AM - 7:00 AM UTC

**[S02-09] Development of a small and high-performance broadband seismometer applicable to hard environments**

\*Ryuhei YAMADA<sup>1</sup>, Kazuyoshi Asari<sup>2</sup>, Hiroaki Shiraishi<sup>3</sup> (1. The University of Aizu, 2. National Astronomical Observatory of Japan, 3. JAXA/ISAS)

4:00 PM - 4:15 PM JST | 7:00 AM - 7:15 AM UTC

**[S02-10] Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor: temperature coefficient**

\*Hajime SHIOBARA<sup>1</sup>, Masanao Shinohara<sup>1</sup>, Toshinori Sato<sup>2</sup>, Aki Ito<sup>3</sup>, Hiroko Sugioka<sup>4</sup> (1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Chiba University, 3. JAMSTEC, 4. KOBEC, Kobe University)

## Classification for Earthquakes with Linked Data

\*Hiroki UEMATSU<sup>1,2,3</sup>, Ahyi Kim<sup>3</sup>, Hideaki Takeda<sup>1,2</sup>

1. The Graduate University for Advanced Studies, SOKENDAI, 2. National Institute of Informatics, 3. Yokohama City University

本研究では、Linked Dataと呼ばれるWeb上のデータを互いにつなげることのできる形式で公開、共有する仕組みを用いて、地震データの整理を行う。また、地震データをLinked Dataで表現するために、地震に関する語彙を作成する。地震動は波形データとして記録され、震源パラメーターの推定、地下構造の推定などさまざまな研究に使われている。またこれらの大量に蓄積された波形データは近年地震学の分野で盛んに用いられる機械学習において、震度予測や、観測波形の分類、P波/S波の検測等の機械学習を用いた研究の教師データとして利用されている。機械学習には大量の良質な教師データが必要であるため、地震観測網で観測されたデータは有用だが、それらの収集には困難が伴う。例えば、防災科学研究所の波形データの取得サイトにはAPI等は用意されておらず、ユーザが日付時刻や震源、観測点等を指定して手動で波形データをダウンロードする必要がある。また、研究者が独自に観測した波形データや、気象庁や地方自治体の観測網を横断して検索するためには、波形データを集約したデータベースの作成等が考えられる。しかし、波形データの再公開はできず、また波形データを一意に指し示すURIを持たないため、研究者独自のデータベースが乱立することとなり、再利用可能なオープンな波形データベースの作成は難しい。そこで、地震動を観測した観測点の情報や震度、観測時刻、また観測された波形から推定された震源の位置やマグニチュードなど、「地震」のメタデータを収集し、Linked Dataの形式で公開する。Linked Dataは事物や概念が一意のURIを持ち、リンク構造を持つことでデータ同士をつなぐことができる。Linked Dataでは、事物や概念のリンク構造をトリプルと呼ばれるモデルで表現し、Webサイトのリンクを辿ることと同様に、プロパティ（リンク）を辿ることで、データを辿ることができる。ここで、Webサイトのリンクは、単なるつながりを示しているが、Linked DataのトリプルではリンクとなるプロパティもURIを持ちリンクの関係性を示している。本研究では、地震データに特化したプロパティとして、震源や震度、観測時刻など地震動に関する語彙や観測点に関する語彙を新たに定義する。例えば、「地震動」は、「震度」「マグニチュード」「発生時刻」等の語彙をプロパティとして持つ。また、「観測した波形」という語彙をプロパティとすることで、ある地震動を観測した波形のトリプルが作成され、「地震」そのものを観測することは難しいが、観測された地震動のリンク構造から「地震」を表現することが可能となる。本研究では、地震語彙の作成、観測波形や震源の情報をもとに地震にURIを付与することでLinked Dataの形式で公開し、地震データおよび学習データとして利用可能な地震カタログの可用性と流通の可能性を検討する。

## Development of multi-platform next-generation WIN system (2)

\*Shigeki NAKAGAWA<sup>1</sup>, Hiroshi AOYAMA<sup>2</sup>, Hiroaki TAKAHASHI<sup>2</sup>, Takuto MAEDA<sup>3</sup>, Naoki UCHIDA<sup>1</sup>, Mare YAMAMOTO<sup>4</sup>, Kazuo OHTAKE<sup>5</sup>, Hiroshi TSURUOKA<sup>1</sup>, Yosuke AOKI<sup>1</sup>, Yuta MAEDA<sup>6</sup>, Shiro OHMI<sup>7</sup>, Haruhisa NAKAMICHI<sup>7</sup>, Makoto OKUBO<sup>8</sup>, Takeshi MATSUSHIMA<sup>9</sup>, Hiroshi YAKIWARA<sup>10</sup>, Katsuhiko SHIOMI<sup>11</sup>, Kenji UEHIRA<sup>11</sup>, Hideki UEDA<sup>11</sup>, Kazuki MIYAOKA<sup>12</sup>, Koji TAMARIBUCHI<sup>13</sup>, Ryo HONDA<sup>14</sup>, Shutaro SEKINE<sup>15</sup>

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Hokkaido University, 3. Hirosaki University, 4. Tohoku University, 5. Systems Design Lab, the University of Tokyo, 6. Nagoya University, 7. Kyoto University, 8. Kochi University, 9. Kyushu University, 10. Kagoshima University, 11. National Research Institute for Earth Science and Disaster Resilience, 12. Japan Meteorological Agency, 13. Meteorological Research Institute, JMA, 14. Hot Springs Research Institute of Kanagawa Prefecture, 15. Association for the Development of Earthquake Prediction

### 1. はじめに

地震・地殻変動等の時系列データの伝送や検測処理に広く用いられているWINシステム（ト部・束田, 1991；ト部・束田, 1992；ト部, 1994など）は、大学等の基幹システムとして25年以上にわたって使い続けられている。特に現在の対話検測処理ソフトウェアは機能向上を図ることが難しく、検測処理の高度化や迅速な情報発表を図る上での障害となりつつある。一方、この四半世紀で、ハードウェアの性能が大幅に向上したほか、マルチプラットフォームに対応した言語や対話処理に優れた入力デバイスの開発・淘汰が進み、ハードウェア環境に依存しないソフトウェア群の構築が可能になってきた。そこで、WIN形式データのリアルタイム伝送が機関の枠を超えた全国規模のデータ流通の基盤となっていることを踏まえ、定期的に更新が進められてきた防災科研や気象庁のデータ伝送システムや対話検測処理システムを参考にしながら、マルチプラットフォームのソフトウェア群（次世代WIN）の開発を進めている。

### 2. 対話検測処理系システムと今後の展望

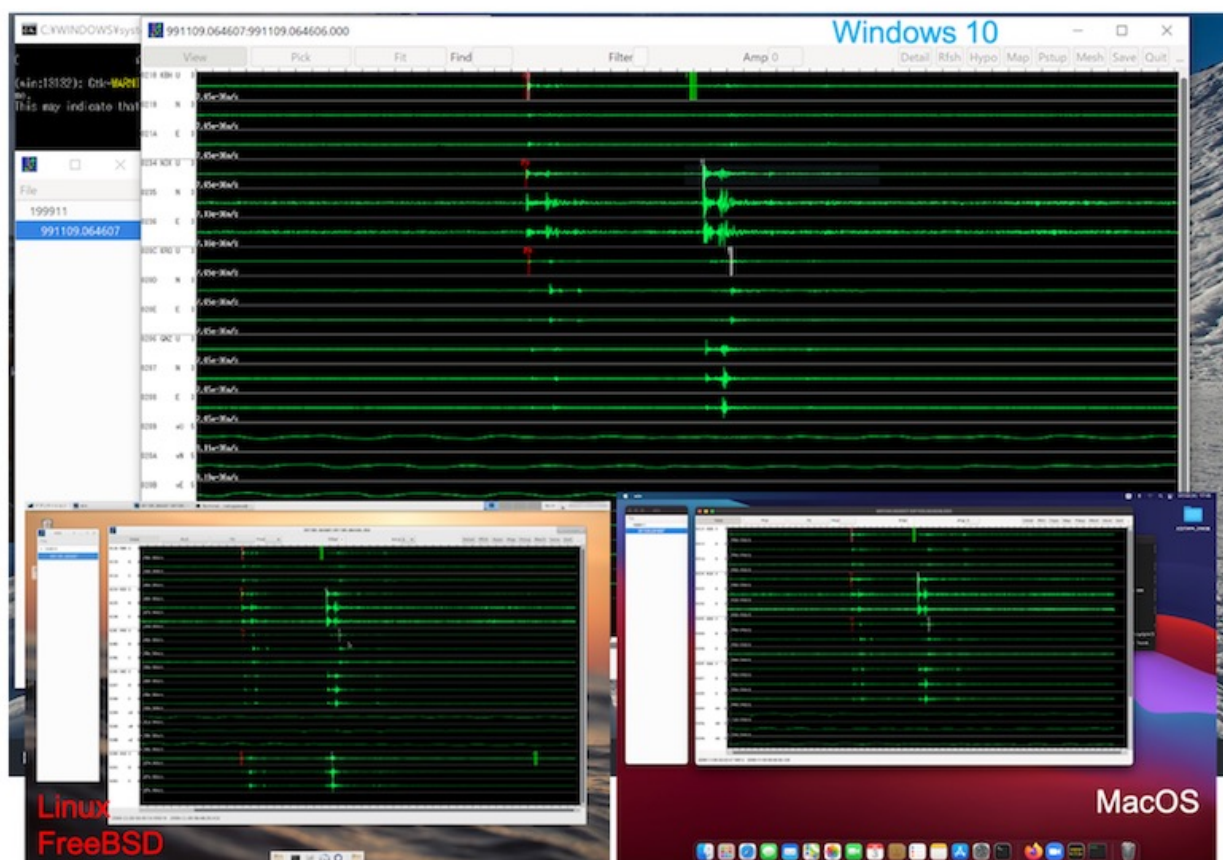
昨年度は波形データの読み込みやマウス操作による検測など対話検測ソフトウェアの基礎となる部分を試作した（中川・他, 地震学会, 2021）。最大の特徴は、1つのソースコードからUnix (Linux, FreeBSD), Windows, macOS の複数プラットフォーム上で動作するネイティブバイナリをそれぞれの環境下でコンパイルできることである。昨年度試作したプログラムは波形表示と手動検測の最小限の機能しか備えていないが、今後の機能拡張が可能な設計となっている。

本研究では、この昨年度試作したソフトウェアに、震源決定プログラムなどの外部コマンド実行機能や地図表示機能を実装した。震源決定プログラムはWINシステムに同梱されているhypomh（Hirata and Matsu'ura, 1987）を用いているが、入出力のフォーマットを整えれば他のプログラムでも差し支えない。震源決定プログラムを利用することで、検測後に震源決定するだけでなく、理論走時を波形に重ねて表示したり（図(a)）、震央距離順に観測点を並べ替えて表示したりできるようになった。また、決定した震源を地震活動と重ねて地図上に表示できるようになった（図(b)）。地図表示では、震源の深さによるカラー表示ができるようになった。

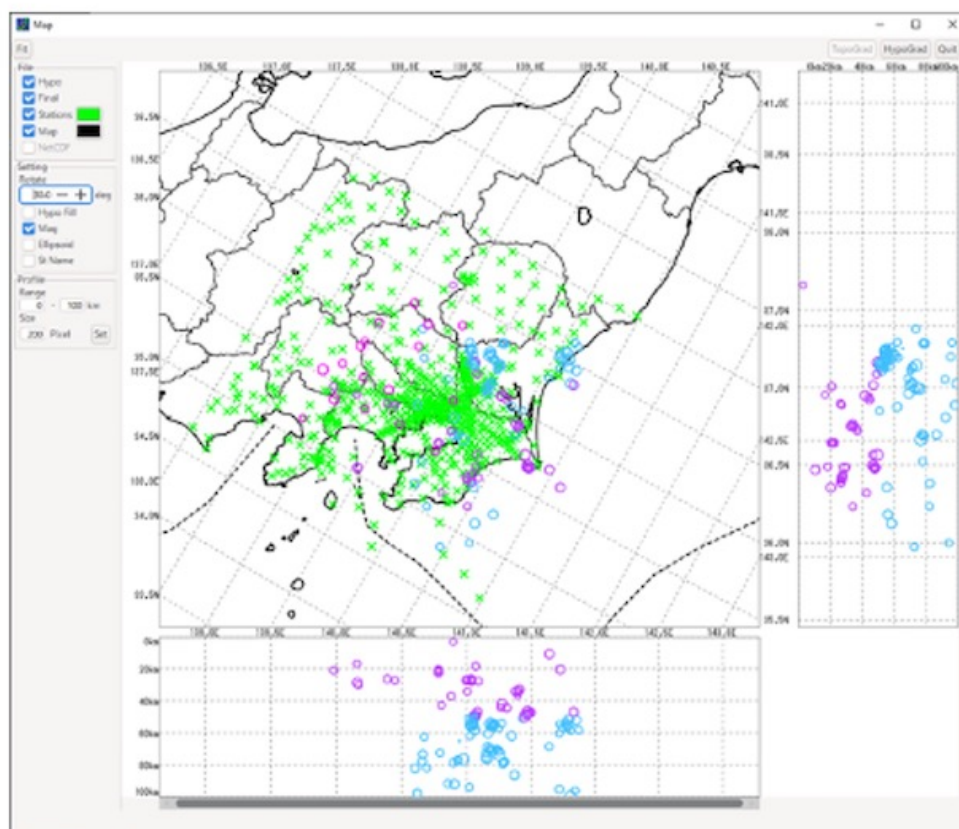
外部コマンド実行機能を実装したことで、他の外部コマンドを用いた機能拡張が可能となった。例えば、発震機構解を求める外部プログラムの利用などが考えられる。対話検測ソフトウェアとして必要最低限の機能は実装できたので、関連する研究者や技術者等で試用しながら、更なる機能拡張を進めていきたい。

謝辞：本研究では、国立研究開発法人防災科学技術研究所、北海道大学、弘前大学、東北大学、東京大学、名古屋大学、京都大学、高知大学、九州大学、鹿児島大学及び気象庁の地震観測データを用いました。ここに記して感謝します。なお、本研究は文部科学省による「災害の軽減に貢献するための地震火山観測研究計画（第2次）」の支援を受けました。

(a)



(b)



## Hypocenter location system with automatic correction of picking data by relative hypocenter location method

\*Shigeki Horiuchi<sup>1</sup>, Yuko Satou<sup>1</sup>, Yoshihisa Iio<sup>2</sup>, Aitarou Kato<sup>3</sup>, Tomomi Okada<sup>4</sup>

1. Home Seismometer Corporation, 2. Kyoto Univ., 3. Univ. of Tokyo, 4. Tohoku Univ.

**1. はじめに** 到着時刻の自動読み取り、震源決定システムの開発が行われ、比較的精度の高い震源が自動決定できるようになった。しかし、各種ノイズの混入のため、全ての観測点の読み取りを正確に行うことは難しい。自動震源決定システムは、走時残差の大きさを利用して、間違った読み取りデータの削除を行っているが、地下構造に大きな不均質性が存在するため、読み取り誤差と、不均質性による走時残差とを区別することが難しい。一方、隣接して発生する2個の地震を相対震源決定すると、不均質性の影響が相殺され、走時残差は小さくなる。相対震源決定の走時残差を用いれば、自動読み取りの誤差が大きい観測点を自動検出できる可能性がある。本報告では、一個の地震について、その近傍で発生するマグニチュードの大きい地震を数10個選び、一個の地震と、数10個の地震との相対震源決定を行うことにより、その地震の各観測点での読み取り誤差を検出し、自動修正を行うシステムを開発した。また、自動震源決定に適した相対震源決定手法を開発したので報告する。

**2. 複数の地震の相対震源決定を用いた読み取り誤差の推定方法** 隣接して発生する地震を、相対震源決定すると、パスの違いによる不均質性の影響が相殺され、走時残差を小さくすることができる。また、大きい地震のS/N比は、小さい地震のそれに比べ高く、読み取り精度は高い傾向にある。そこで、自動震源決定された地震 $A_k$ について、その近傍に震源決定され、かつ、マグニチュードの大きい地震を $N$ 個( $B_{km}$ )選ぶ。地震 $A_k$ と、その $j$ 観測点の読み取り値を $A_{kj}$ 、地震 $B_{km}$ との相対震源決定の、 $j$ 観測点の走時残差を $R_{kmj}$ とする。読み取り誤差の推定は、その理論的到着時刻 $T_{kj}$ を推定することにより行う。読み取りが行われ、 $A_{kj}$ が存在する場合は、 $T_{kj}$ は、走時残差 $R_{kmj}$ の平均値と $A_k$ との和で表される。 $A_{kj}$ の読み取り値が存在しない場合で、地震 $B_{km}$ の $j$ 観測点の到着時刻が存在する場合は、この読み取りデータを満足するように、地震毎に、 $A_k$ の $j$ 観測点の理論走時を求め、その平均値で理論走時を与えるようにした。この方法の最大のメリットは、地震 $A_k$ の到着時刻が、 $N$ 個の地震の読み取りデータから精度よく推定できる点である。ここでは、 $N=50$ とした。また、走時残差 $R_{kmj}$ の平均値は、先ず、平均値と、分散を計算し、誤差が2乗平均誤差を超えるデータを削除して、求めるようにした。到着時刻の再読み取りは、読み取り値が、推定された到着時刻の2乗平均誤差の2倍を超える範囲外だった場合に行うようにし、顕著な位相の立ち上がりがあり、その範囲内に存在する場合に、読み取り値を採用するようにした。

**3. 相対震源決定** Waldhauser & Ellsworth (2000)によるHypoDDは、解析する全領域で発生する全地震の相対震源決定の誤差が最小となるように震源決定する方法である。自動震源決定は、日本列島全域で発生する地震を対象にして行う場合もある。また、地震は、毎日発生することから、地震が発生する度に、過去に遡って、HypoDDを行うと、計算機の負荷は膨大になる。そこで、ここでは、上記 $N$ 個の地震 $B_{km}$ の震源位置をレファレンスとして、全ての $B_{km}$ の地震との相対震源決定の走時残差の2乗和を最小となるように、 $A_k$ の震源位置を求めるようにした。すべての $A_k$ について、この震源決定を行うと、 $B_{km}$ に属する個々の地震も、同様に、周りで発生する $N$ 個の地震で相対震源決定される。本震源決定では、この操作を2回繰り返し、相対震源決定された $B_{km}$ の地震位置をレファレンスとして、 $A_k$ の地震の相対震源決定を行うようにした。

**4. 結果** 解析には、2016年10月21日マグニチュード6.6の鳥取県中部地震の発生の翌日の24時間の、京大・九大・東大地震研合同余震観測班(Iio et al., 2020)による地震観測データ、及び、2017年3月〜4月の福島県いわき周辺で発生した地震のHi-netデータを用いた。堀内・他(2009)による自動震源決定システムで震源決定されて地震のトリガー波形とピックファイルを用いて、上述の方法で、走時残差の大きい観測点の再読み取り、読み取りが行われていない観測点の再読み取りを行ない、相対震源決定を行った。通常の自動震源決定と、本方法による震源決定結果の比較、及び、一元化震源と、本方法によるそれとの比較から、本方法の適用により、詳細な震源分布が得られることが示された。また、鳥取県中部地震のデータを用いた場合の、相対震源決定の走時残差の平均値は、0.11秒であった。東北地方、海域で発生する地震についても、本方法の有効性を調べる予定である。

## Development of a small and high-performance broadband seismometer applicable to hard environments

\*Ryuhei YAMADA<sup>1</sup>, Kazuyoshi Asari<sup>2</sup>, Hiroaki Shiraishi<sup>3</sup>

1. The University of Aizu, 2. National Astronomical Observatory of Japan, 3. JAXA/ISAS

地震の発生メカニズムや天体の内部構造に関する研究は、地震計による観測網拡張に伴い進展してきている。その一方で、一般に、海底、火山地域、極域、月惑星等、いわゆる人が地震計を運搬し、設置するのが困難な極限環境下に、地震観測網を展開するのは決して容易ではない。本研究では、極限環境域への地震観測網展開を目指すため、小型軽量、かつ高性能の広帯域地震計の開発を進めている。

この開発において、我々は宇宙機用として開発された短周期地震計(図1)をベースに周波数応答の広帯域化を実施してきた。この地震計は固有周波数1Hzの電磁コイル式の短周期地震計であり、同タイプの地震計と比較しても小型軽量(直径5cm×高さ5cm, 重量350g)でありながら、より高い感度(1000V/m/sec)を実現しているため、火山噴火地域や月惑星等、無人で観測装置を運ぶ際に有利となる。また、この地震計は航空機等からの投下により無人でのセンサー設置が可能なハードランディングプローブであるペネトレータにも搭載できる。ペネトレータは槍型の貫入装置であり、地震計を搭載しての地上試験実績も有している。開発した地震計は、このペネトレータの貫入衝撃に耐えて微小振動を観測できるだけの頑健性もすでに実現している(Yamada et al., 2009)。この小型軽量で汎用性の高い短周期地震計を広帯域化する事で、地震計の運搬・設置が困難な極限環境域で例え一点設置であっても、より多くの観測成果を得る事が期待できるようになる。

本研究では、この短周期計に容量変位検出器とフィードバック機構を取り付けて広帯域化を図り、1Hzよりも長周期側でも高感度(1000V/m/sec以上)を実現する事を目指した。この広帯域地震計として、我々は図1に示す地震計の振り子とケースの両端面に電極版を取り付けて、検波回路を接続することで、地動変位に伴う容量変化を検出できるようにした。そして、この地震計で固有周期10-30秒を実現するための負帰還回路の設計と製作を行った。この負帰還回路をセンサーに取り付けて、周波数応答の計測を実施したところ、設計通りの応答を示し、少なくとも0.1-20Hzの間で、約2000 V/m/secの感度を実現可能な事を確認する事ができた。そして、広帯域地震計の地動応答の評価のため国立天文台水沢の江刺地球潮汐観測所で、リファレンス用の広帯域地震計(CMG3 ESP)との比較観測を実施した。その結果、現状、0.15~1Hz程度までは、開発した広帯域地震計はリファレンス地震計と同等の応答を示す事を確認できた。一方、長周期側では、リファレンス地震計よりも、ノイズがより多く観測波形に含まれる事も示されたので、現在、負帰還回路の小型化や低ノイズOPアンプの使用などで、地震計の低ノイズ化を図っている。

本発表では、この小型負帰還回路を使用した結果も含めて、広帯域地震計の設計、これまでの開発状況、及び実験室や江刺での試験結果について、報告・議論する予定である。

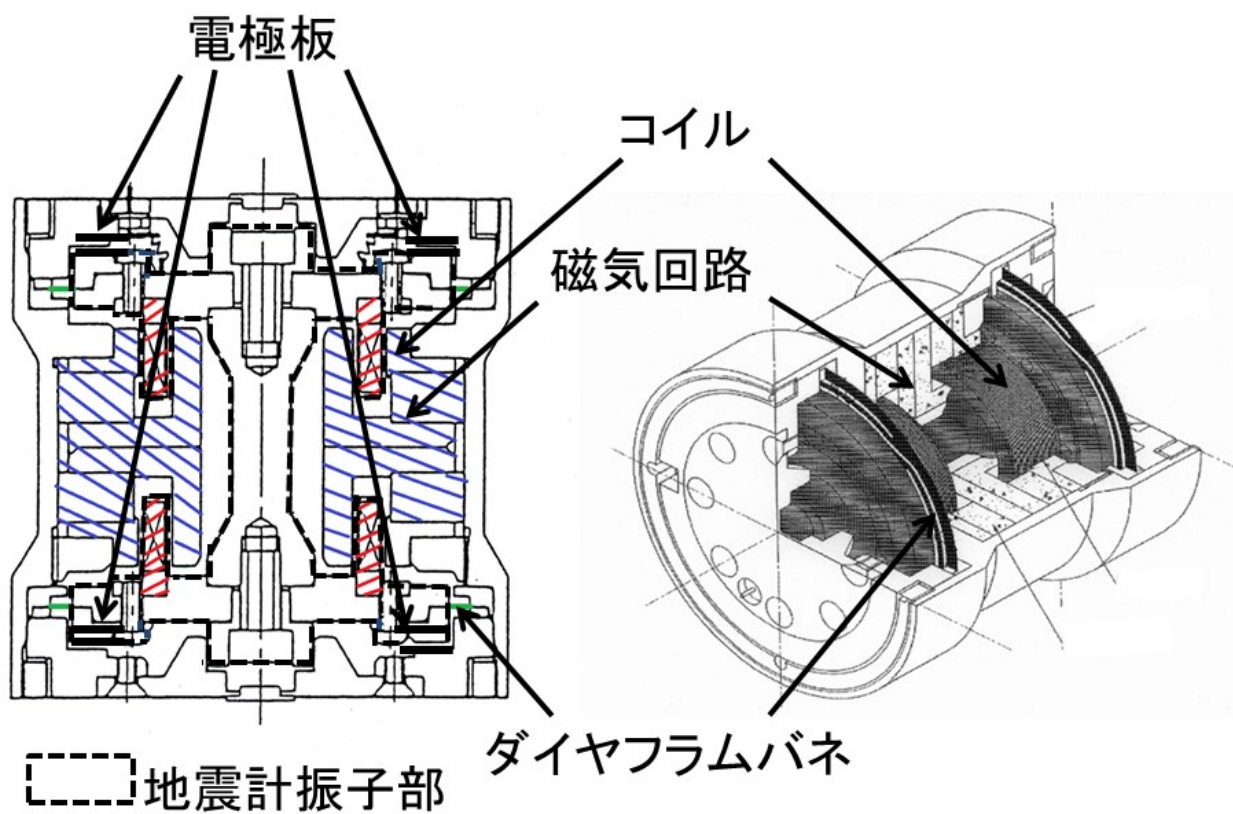


図1.短周期地震計の断面図と鳥瞰図

## Long-term test for practical mobile tilt observation at the seafloor: temperature coefficient

\*Hajime SHIOBARA<sup>1</sup>, Masanao Shinohara<sup>1</sup>, Toshinori Sato<sup>2</sup>, Aki Ito<sup>3</sup>, Hiroko Sugioka<sup>4</sup>

1. Earthquake Research Institute, the University of Tokyo, 2. Chiba University, 3. JAMSTEC, 4. KOBE, Kobe University

### 1. はじめに

機動的な海底傾斜変動観測の実用化に向け、新型の広帯域海底地震計(BBOBS-NX)を基にしたBBOBST-NXによる長期観測について2014年・2017年・2021年の地震学会で報告した[1][2][3]。今回は、2020年に回収したBBOBST-NXの観測データに見られた傾斜値の温度依存性についての続報である。

### 2. 計測・処理方法

BBOBS-NXでは独立した広帯域センサー部が海底面に大半埋設されており、底層流の影響による傾斜変動はほぼ無く、海底堆積層との結合も良好である。広帯域センサーの水平動2成分のマスポジション信号(加速度出力)を速度信号3成分と併せ連続記録するBBOBST-NXは、広帯域地震・傾斜変動を同時観測できる(図A)。実際に得られた記録には、広帯域センサーの経時変化とマスのセンタリングによるシフトが見られる。シフトの前後で記録はほぼ連続しており、シフト分を補正した後に適当な関数(1次+対数)をgnuplotを使い当てはめ、経時変化を差し引き、傾斜変動の記録を得る。海底での潮汐による傾斜変動は約 $0.1 \mu\text{rad}$ と小さいがbaytap08プログラム[4]を適用して潮汐成分を取り除く。

### 3. 長期試験観測と取得データ

房総半島南東沖で繰り返しSSEが発生している領域で2013-2014年、2015-2017年に長期試験観測を実施した。初回は数m離れた流向流速計で、2回目は自記式精密水温計をBBOBST-NXの外装に取り付け、水温等も記録した。基本的な処理を済ませた傾斜変動には、2成分共に水温変化との明確な関連性(約 $-30 \mu\text{rad}/^\circ\text{C}$ )が見えた(図B)。同じ個体の広帯域センサーを用いた、2012-2013年と2013-2014年の過去2回での試験観測での結果[5]では、傾斜変動と水温変化の関係が明確に示せなかったが、2015-2017年の観測結果からは温度依存性が確認できた。これらの傾斜変動と水温変化の関係をみると、全て共通して負の温度係数で傾斜値が変化していることから、水塊移動による傾斜変動ではなく、BBOBST-NX自体での温度依存性であると判断できる。この温度依存性の影響を傾斜変動から除去する方法を試し、周波数領域で温度係数を推定してその分を差し引くことにした。過去2回の傾斜記録に対しても同様な処理を行ったが温度係数が、同じオーダーではあるがやや異なった。この処理後、2014年のSSE時に見られた傾斜変動は、2成分共にその存在が明確になった。

### 4. 温度依存性の要因

過去3回の海底傾斜観測時には同一個体の広帯域センサーを使用していたが、温度係数には差があるように見られた。これは広帯域センサーと水温測定場所との距離がそれぞれで異なるのが原因とも考えられる。また一方で、BBOBST-NXのセンサー部の構造(図C)から、3成分の各1成分を内蔵する筒型耐圧容器間を固定しているチタン合金製のバーの膨張係数( $8.8 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ )でも同程度の傾斜変化が起こる可能性もある。そこで、広帯域センサー自体のマスポジション信号の温度依存性を確認するべく、高精度の小型自記温度計を使った室内試験を2022年7-8月に地震研究所内の実験室環境で実施した。安定したマスポジション信号が得られた約3週間分の傾斜変動と広帯域センサーの容器(メーカー出荷用、3成分一体)内での温度変化を比較すると、既知の温度係数より小さい、約 $-10 \mu\text{rad}/^\circ\text{C}$ と見られた。但し、この広帯域センサーの個体が上記の海底傾斜観測時(図B)のものとは異なること、温度係数自体が温度に依存する可能性もあることから、まだ完全には結論付けられない。

### 5. まとめ

室内試験の結果からは、やはり広帯域センサー内部での精密温度計測を行い、その温度係数を推定することが重要であるのが明確となった。広帯域センサー自体に高精度の温度測定機能を組み込むことが必要であり、今後、製造会社と協議する予定である。

#### 参考文献

- [1] 塩原・他, 日本地震学会秋季大会, C32-09, 2014.
- [2] 塩原・他, 日本地震学会秋季大会, S02-07, 2017.
- [3] 塩原・他, 日本地震学会秋季大会, S02-02, 2021.
- [4] Tamura, Y., et al., GJI, 104, 507-516, 1991.
- [5] Shiobara, H., et al., Front. Earth Sci., 8:599810, 2021.

